



15. VDI-Fachkonferenz  
14.06. - 15.06.2016, Berlin  
Feuerung und Kessel - Beläge und Korrosion - in  
Großfeuerungsanlagen

Beschreibung des Brennstofftransports mit  
„einfachen“ Gleichungen

Martin H. Zwiellehner, Dr. Ragnar Warnecke, Florian Grafmans, Volker Müller

## INHALT

- Einleitung, Intention, Problemstellung
- Allgemeines zur Brennstoffbeschickung in MVA
- Brennstoffdichte
  - Versuche außerhalb der Feuerung
  - Versuche im Bereich der Brennstoffaufgabe
- Versuche zur Brennstoffbeschickung
  - Videobildbasierte Beobachtungen
  - Ermittlung der Kompressibilität im Anfahren und im lfd. Betrieb
  - Variation des Beschickhubs
- Numerische Ermittlung v. Brennstoffmassenstrom u. Rohdichte
  - Evidenzbasierter bzw. datengestützter Ansatz
  - Geometrisch physikalischer Ansatz
- Ausblick
  
- Randbemerkungen

BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN“ GLEICHUNGEN - [MARTIN ZWIELLEHNER](#), RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## EINLEITUNG, INTENTION, PROBLEMSTELLUNG

- Ursache liegt im Forschungsvorhaben VOKos begründet.

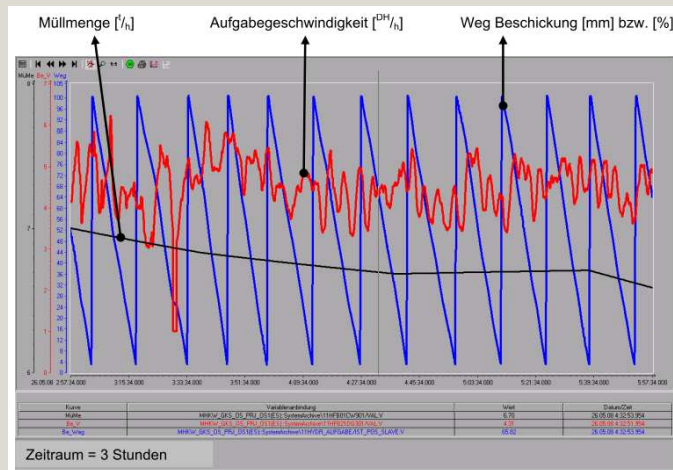
<http://www.matressource.de/projekte/vokos/>



- Es wird eine Optimierung von Teilmodellen des Modells CombAte gefordert.
- Schwerpunkt = Feststofftransport insbes. Brennstoffaufgabe.
- Randbedingung : Essentielle für eine Modellierung der Rostfeuerung ist die Kenntnis des aufgegebenen Brennstoffmassenstroms.
- Probleme in diesem Kontext:
  - Stößelbeschickung ist eine quasi-kontinuierliche Beschickung, d.h. für eine exakte Vorhersage muss die Brennstoffaufgabe zeitlich aufgelöst werden.
  - Für bestehende Anlagen ist dies – aufwändig und über Umwege – möglich.
  - Jedoch gibt es keine on-line Adaptierung auf sich ändernde Betriebszustände.
  - Ziel ist jedoch eine Übertragbarkeit der Modellvorstellung auf andere Anlagen – die u. U. noch gar nicht gebaut sind, d. h. es gibt noch keine Datenbasis.

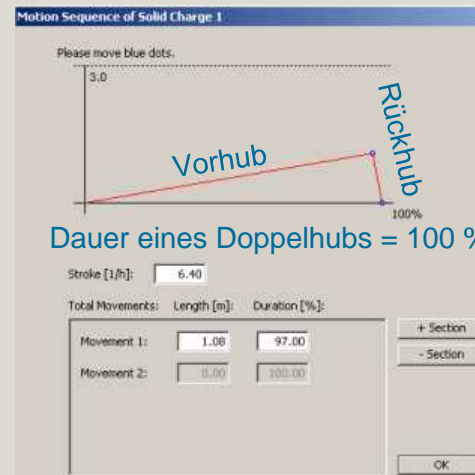
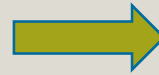
## EINLEITUNG, INTENTION, PROBLEMSTELLUNG

- Ist-Stand zur Modellierung des Brennstoffmassenstroms in CombAte:



2.

Nr.	Monat	Müllmenge	Beschickhöhe	Müllmenge pro Beschick-DH
		11HFB01CW901	11HFB21DG301	
1	Dez 07	7,41 $\frac{t}{h}$	5,92 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,252 t
2	Jan 08	7,73 $\frac{t}{h}$	5,55 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,393 t
3	Feb 08	7,89 $\frac{t}{h}$	5,81 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,358 t
4	Mrz 08	7,38 $\frac{t}{h}$	5,24 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,408 t
5	Apr 08	6,95 $\frac{t}{h}$	5,32 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,306 t
6	Mai 08	6,97 $\frac{t}{h}$	4,86 $\frac{Dh}{h}$	1 DH = 1,434 t
7	Mittelwert			1 DH = 1,359 t

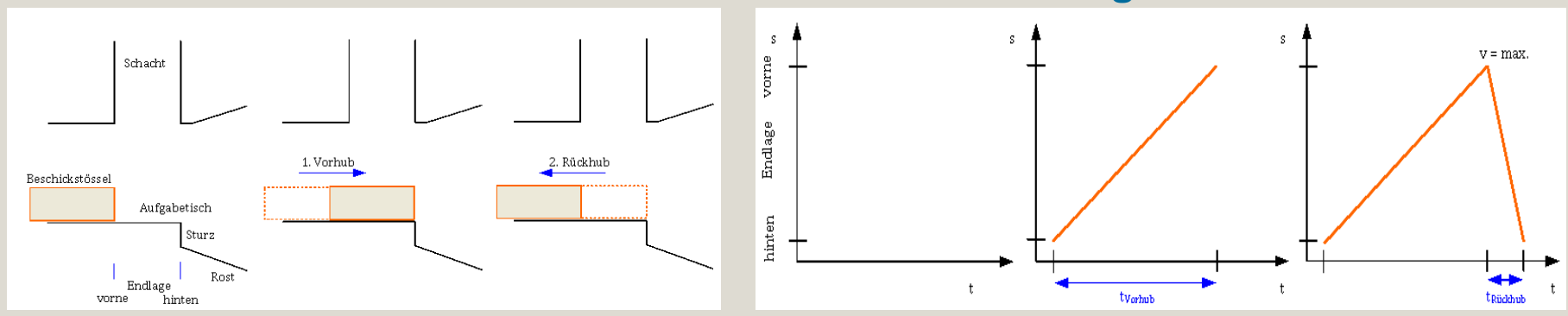


## EINLEITUNG, INTENTION, PROBLEMSTELLUNG

- Annahme = linearer Zusammenhang zwischen Anzahl Doppelhübe (Dh) und Brennstoffmassenstrom.
- In erster Näherung OK, aber:
  - Ermittlung der Dh muss exakt und über einen möglichst langen Zeitraum ermöglicht sein.
  - Ändern sich betriebliche Rahmenbedingungen wie z.B. Hublängen, Endlagen, mech. Modifikationen wirkt sich dies nicht auf die Modellvorstellung aus.
  - Effektiver Brennstoffmassenstrom [t/h] muss bekannt sein.
- ➔ Keine zufriedenstellende Situation, weil ein Ziel ist die Vorkonfektionierung einer Feuerungsleistungsregelung mit qualitativ korrekten Parametern.
- ➔ Hierzu ist es notwendig, den Brennstoffmassenstrom pro Doppelhub der Beschickung nur aufgrund von betrieblichen (Hublängen, Endlagen, Hubposition) und konstruktiven Parametern (Geometrie Aufgabebereich) vorausberechnen zu können.

## ALLGEMEINES ZUR BRENNSTOFFBESCHICKUNG IN MVA

- Beschiekeinrichtung einer MVA besteht aus Zuteilungsorgan (Müllkran), Brennstoffvorlage (Aufgabeschacht, Aufgabetrichter) und der eigentlichen Beschiekeinrichtung zur Entnahme von Brennstoff aus dem Schacht und dessen Dosierung auf den Verbrennungsrost.
- Stand der Technik ist die Stößelbeschickung mit Einzel- od. Doppelkolben als Aufbau mit hydraulischen Antrieben, Proportionalventilen, Wegmessungen und Positionsregelung.
- **Entscheidend: welches Volumen wird pro Doppelhub gefördert? Welche Dichte herrscht unmittelbar im Bereich der Förderung?**



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN“ GLEICHUNGEN - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## ALLGEMEINES ZUR BRENNSTOFFBESCHICKUNG IN MVA

- **Entscheidend: welches Volumen wird pro Doppelhub gefördert? Welche Dichte herrscht unmittelbar im Bereich der Förderung?**
- **Und: von welchen Faktoren wird Fördervorgang beeinflusst (Sensitivität)?**
- **Konstruktive oder betriebliche Einflussgrößen?**

→ Als Antwort auf diese Frage gibt es keine allgemein gültigen, nachvollziehbaren, belastbaren Aussagen und wenig bis keine Literatur.

→ „Versuch macht klug“ !

→ Welche Versuche? Wie sollen diese ablaufen? U.v.a. wo sollen diese Versuche gemacht werden?

→ 1. Schritt: Analyse des Brennstoffs hinsichtlich seinen Eigenschaften (Hu, Förderfähigkeit, Korngrößen, Dichten, ...)

→ 2. Schritt: Kompressibilität (und Dichten) ermitteln.



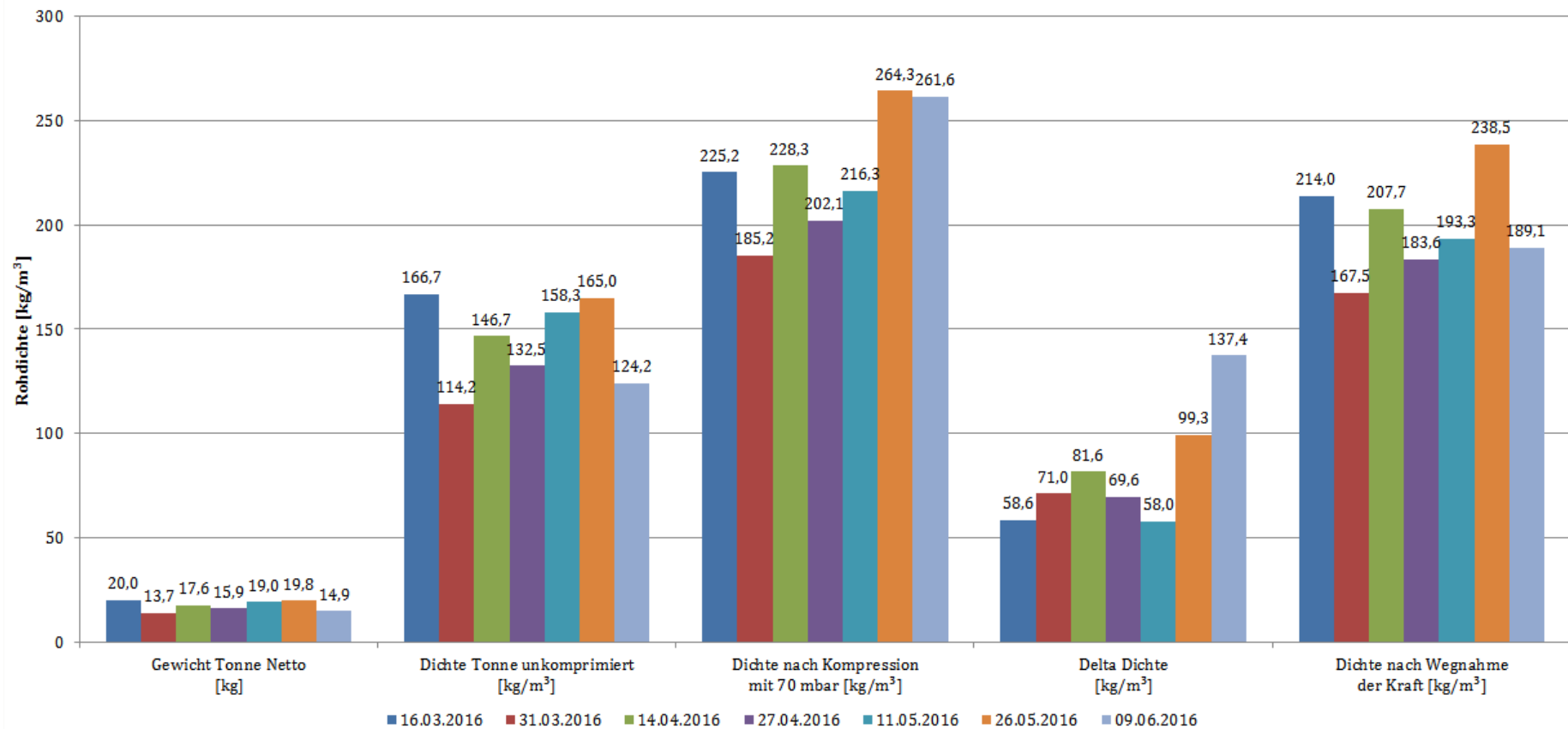
## HAUSMÜLLTonne - DICHTe UND KOMPRESSIBILITÄT BESTIMMEN



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - [MARTIN ZWIELLEHNER](#), RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## HAUSMÜLLTonne - DICHTe UND KOMPRESSIBILITÄT BESTIMMEN

Rohdichte Hausmüllbehälter – komprimiert und unkomprimiert:



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## HAUSMÜLL - DICHTE UND KOMPRESSIBILITÄT BESTIMMEN

Portalpresse Fa. Strautmann:

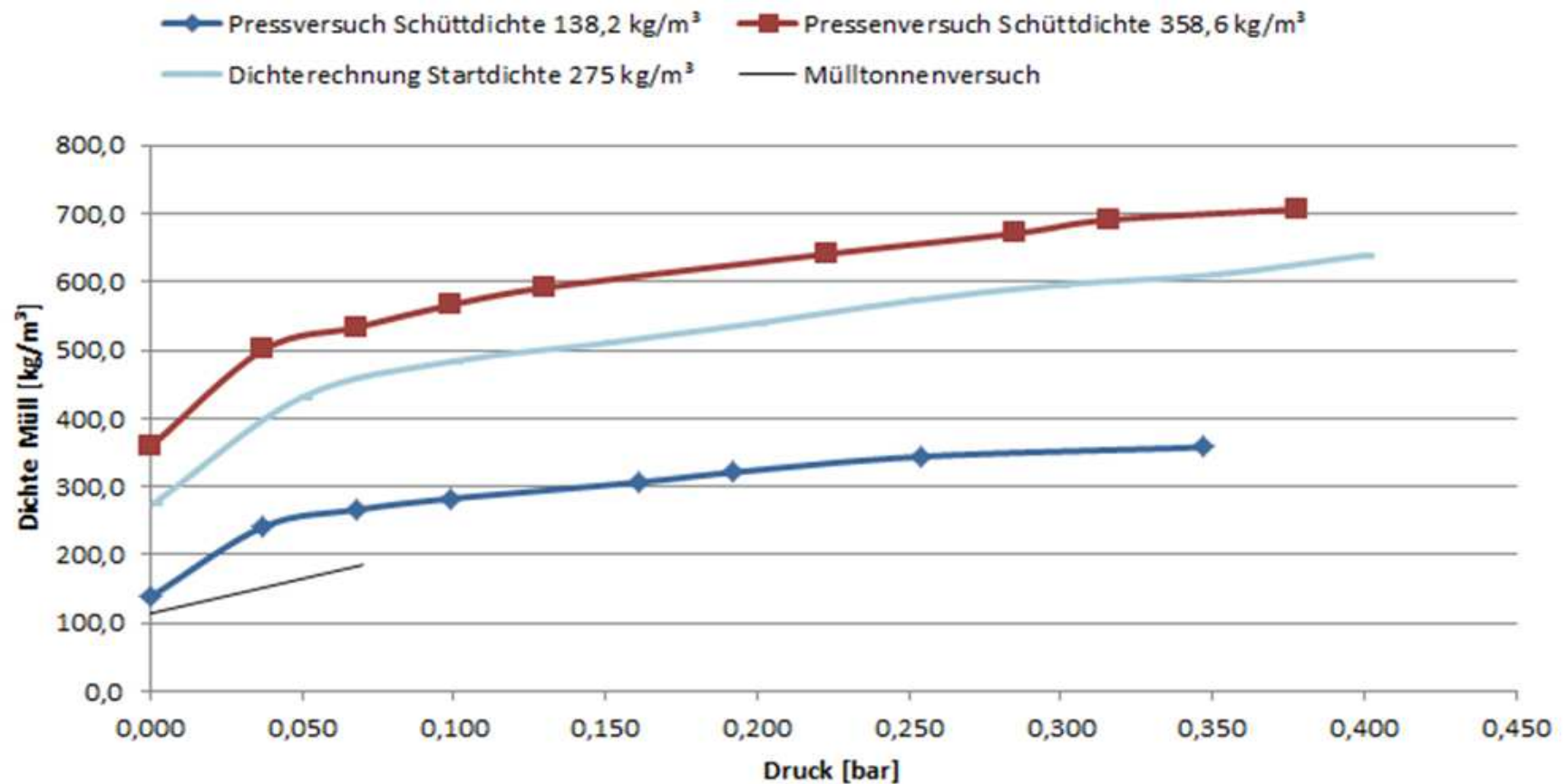


- Definiertes Volumen vorhanden.
- Hydraulikzylinder bis max. 580 kN  $\cong$  7 bar.
- Durch Umbau der Hydraulik konnte der Vorhubdruck stufenlos eingestellt und gemessen werden.
- Somit kontrollierte Verdichtung möglich.
- Volumenreduktion durch Laser-Entfernungsmessung.
- Versuche mit Abfall unterschiedlicher Ausgangsdichte (140 kg/m<sup>3</sup> und 360 kg/m<sup>3</sup>).

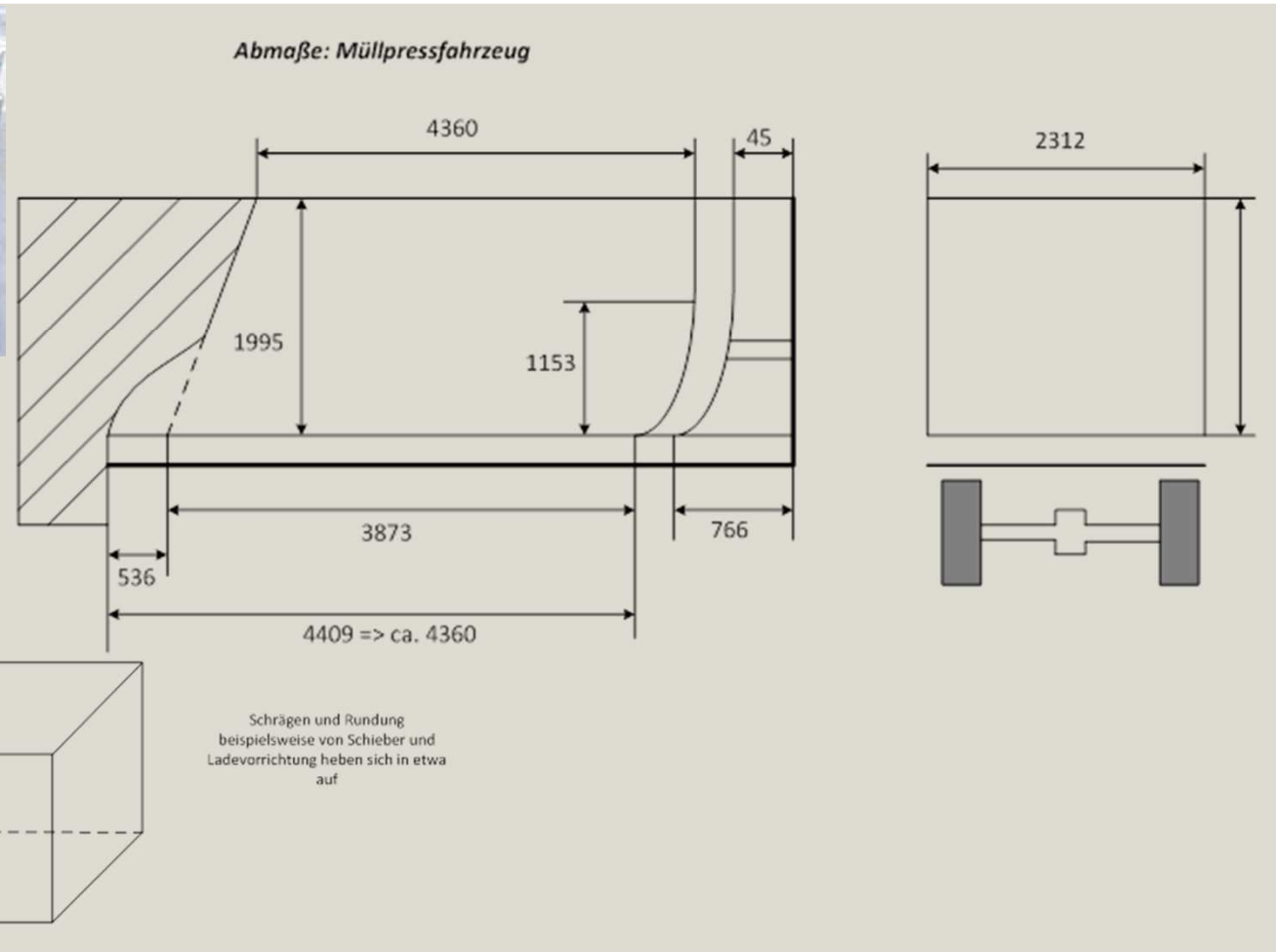
BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - [MARTIN ZWIELLEHNER](#), RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## HAUSMÜLL - DICHTe UND KOMPRESSIBILITÄT BESTIMMEN

### Dichte Müll über Druck

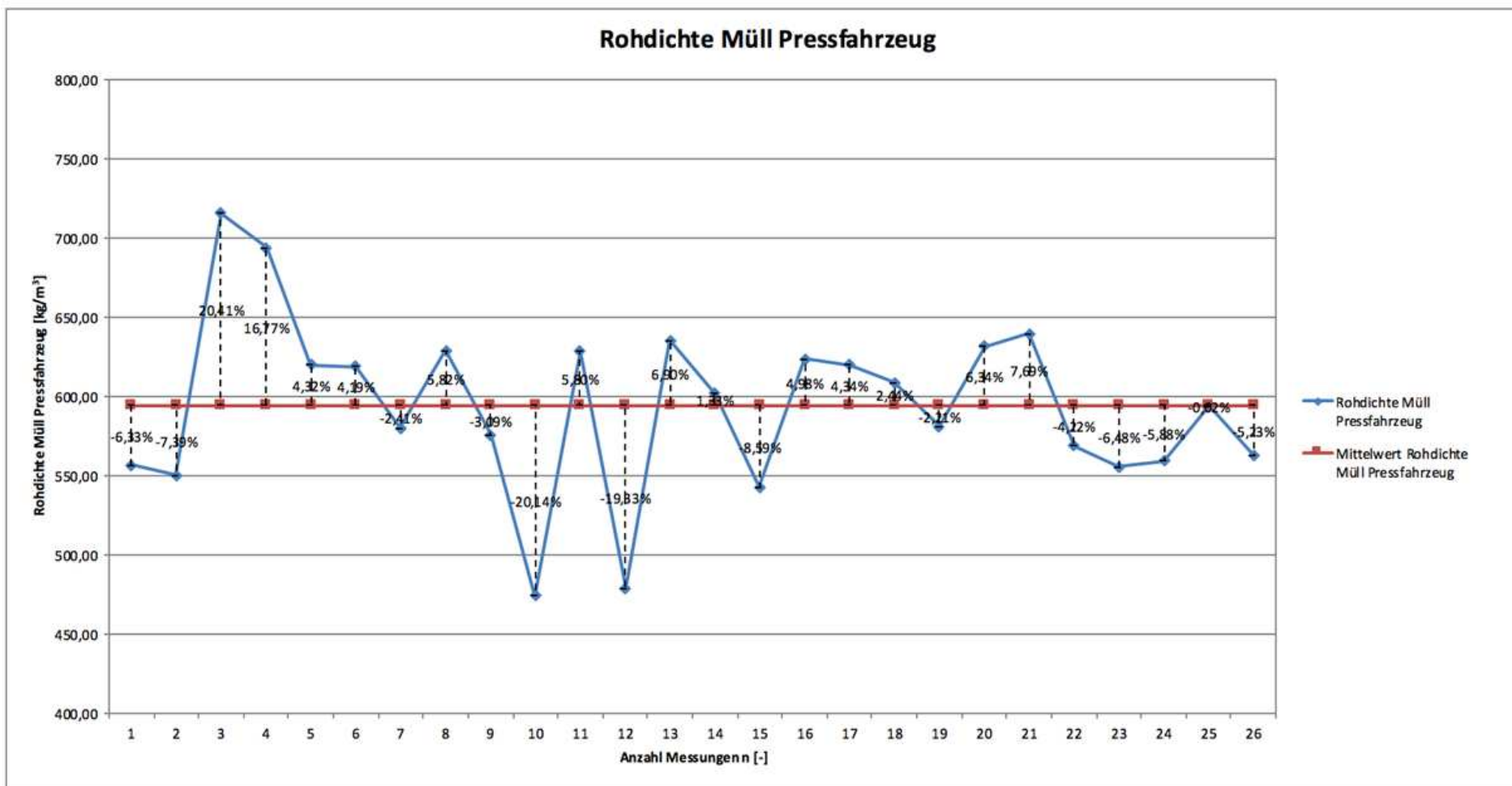


## DICHTEBESTIMMUNG IM MÜLLPRESSFAHRZEUG:

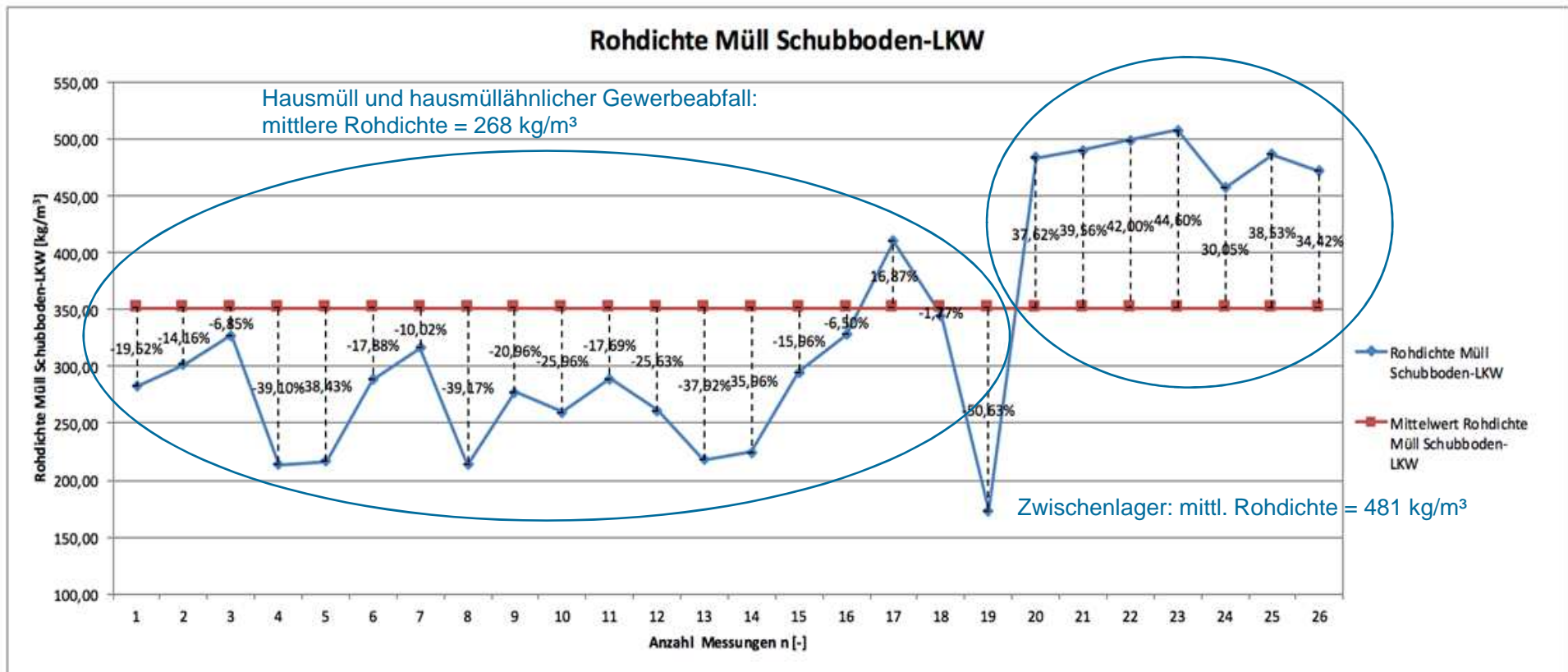


BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - [MARTIN ZWIELLEHNER](#), RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## DICHTEBESTIMMUNG IM MÜLLPRESSFAHRZEUG:

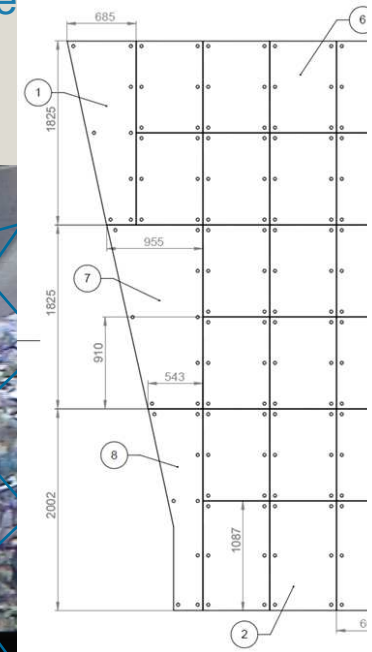


## DICHTEBESTIMMUNG IM SCHUBBODENFAHRZEUG:



## BESTIMMUNG BRENNSTOFFDICHTE IM AUFGABEBEREICH

- Masse von aufgegebenen Müll durch Müllkranwaage bekannt.
- Mit Trichtergeometrie und Verschleißplatten abschätzen des aufgegebenen Volumens
- Exakte Maße der Verschleißplatten müssen bekannt sein (Abb. symbolisch!).



→ mittlere Schüttdichte im Aufgabebereich  $\approx 275 \text{ kg/m}^3$ .

NB: Rohdichte Müllkran  $\approx 670 \text{ kg/m}^3$ .

## BESTIMMUNG BRENNSTOFFDICHTE IM AUFGABEBEREICH

- Volumenbetrachtung anwenden auf Beschickhub, d. h.: Volumen Aufgabeschieber = 1050 mm x 3130 mm x 300 mm = 0,986 m<sup>3</sup>.
- Während Rückhub des Aufgabeschiebers sollte nur das zuvor verdrängte Volumen wieder „nachrutschen“?!
- Über die Abmessungen der Verschleißplatten kann das nachgerutschte Volumen - über eine Vielzahl an beobachteten Hüben - relativ genau bestimmt werden.

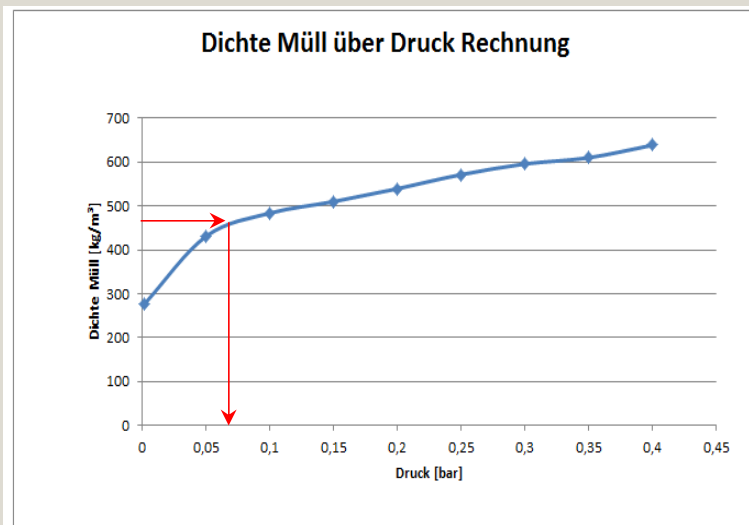


- Das nachrutschende Volumen ist > als das Volumen des Aufgabeschiebers.
- 1,64 m<sup>3</sup> > 0,986 m<sup>3</sup>
- Kompaktierungsfaktor ≈ 1,7
- Dichte vor Aufgabeschieber ≈ 460 kg/m<sup>3</sup> (anlagenspezifisch!)

BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## BESTIMMUNG BRENNSTOFFDICHTE IM AUFGABEBEREICH

→ Aus dem Versuch mit Portalpresse ist der Zusammenhang Druck u. Dichte bekannt.



Polynom 5. Grades  $\rho_{Müll,Druck} = 503784 \cdot p^5 - 574030 \cdot p^4 + 244120 \cdot p^3 - 48263 \cdot p^2 + 4996,6 \cdot p + \rho_{Müll,Roh}$

→ Aus dem Versuch mit Portalpresse ist der Zusammenhang Druck u. Dichte bekannt.

→  $460 \text{ kg/m}^3 \triangleq 71 \text{ mbar}$  am Schachtboden.

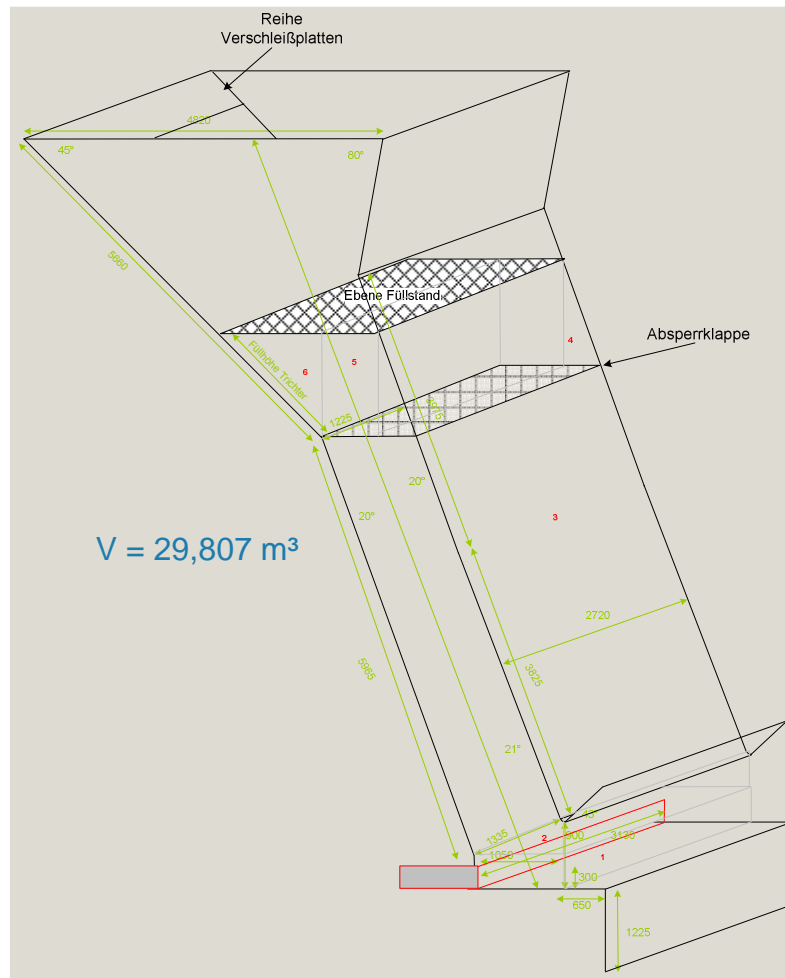
→ Validierung der Näherungsformel (und des berechneten Druckes) ist somit möglich:

→ Dichte Trichter oben =  $275 \text{ kg/m}^3$  (Messung, d.h. valide)

→ Dichte Schacht unten =  $460 \text{ kg/m}^3$  (Messung, d.h. valide)

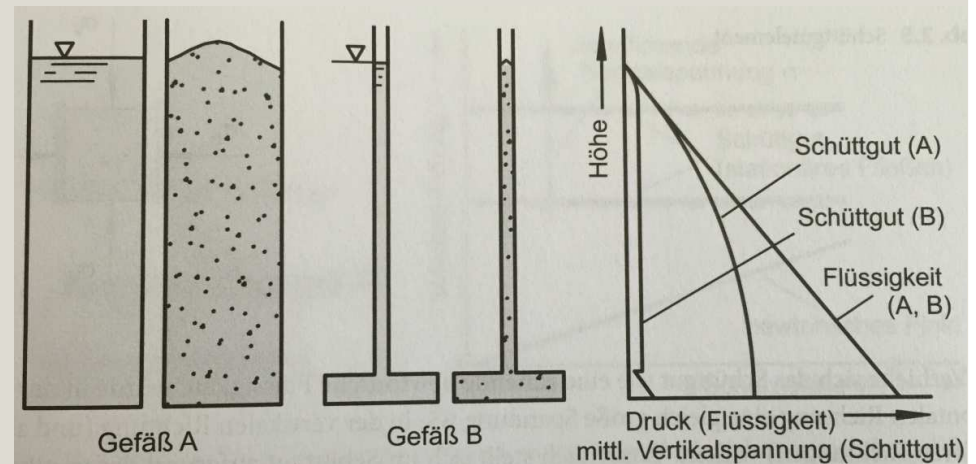
→ Mittlere Dichte im Schacht =  $367,5 \text{ kg/m}^3$

## BESTIMMUNG BRENNSTOFFDICHTE IM AUFGABEBEREICH



- Nun kann über gefülltes Volumen und bekannter Dichte die Masse im Schacht gerechnet werden.
- Resultat: Der aus der Gesamtmasse berechnete Druck auf den Boden des Müllschachts ist >> als der aus der Näherungsformel bzw. den Pressenversuchen ☹ ☹ ☹

Warum? → Darum:



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

# AP 2.3 - FAZIT Untersuchungen zur Brennstoffaufgabe & -transport

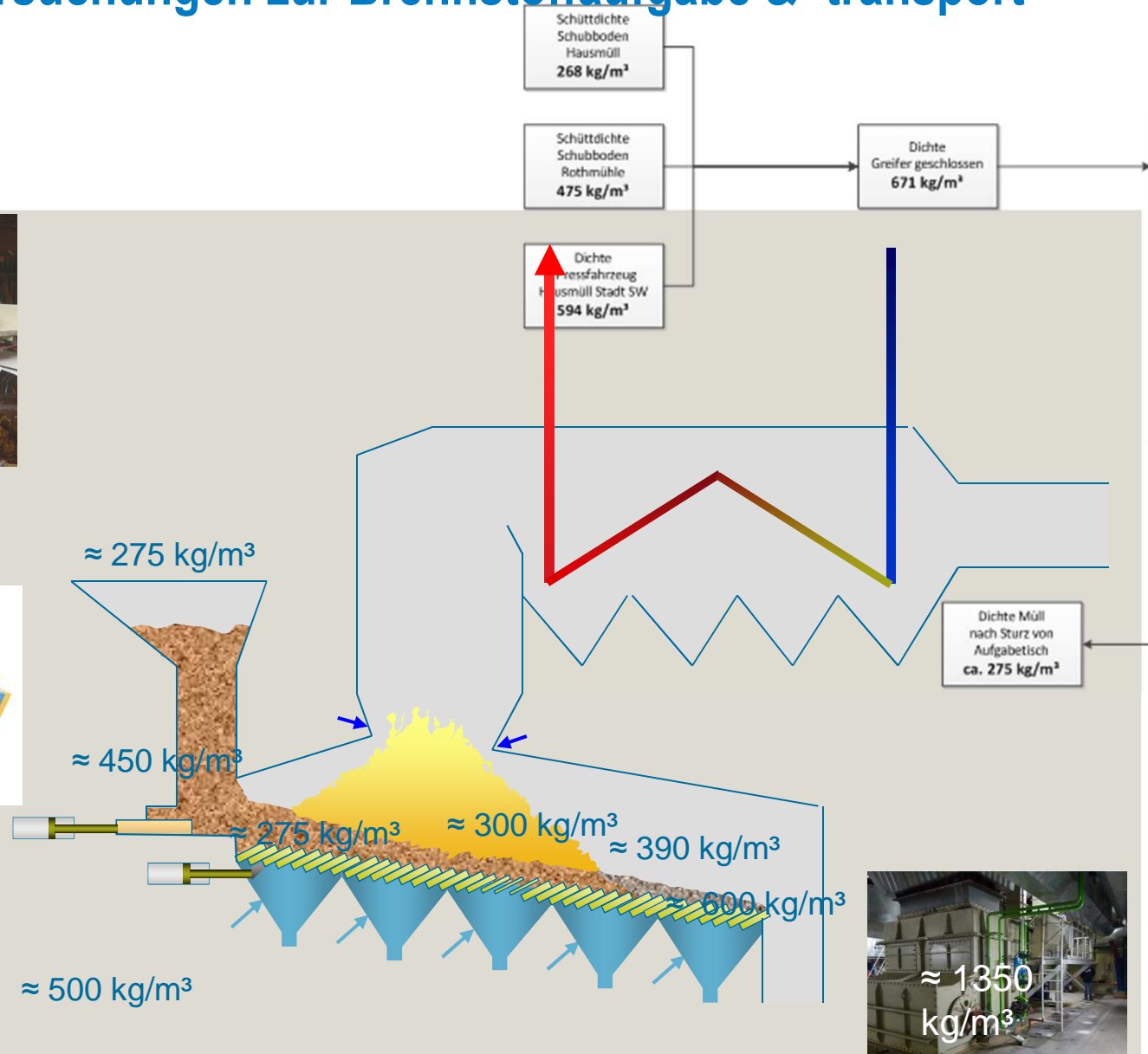
Wissensforum



270 kg/m<sup>3</sup> walking floor  
550 kg/m<sup>3</sup> Pressfzg.

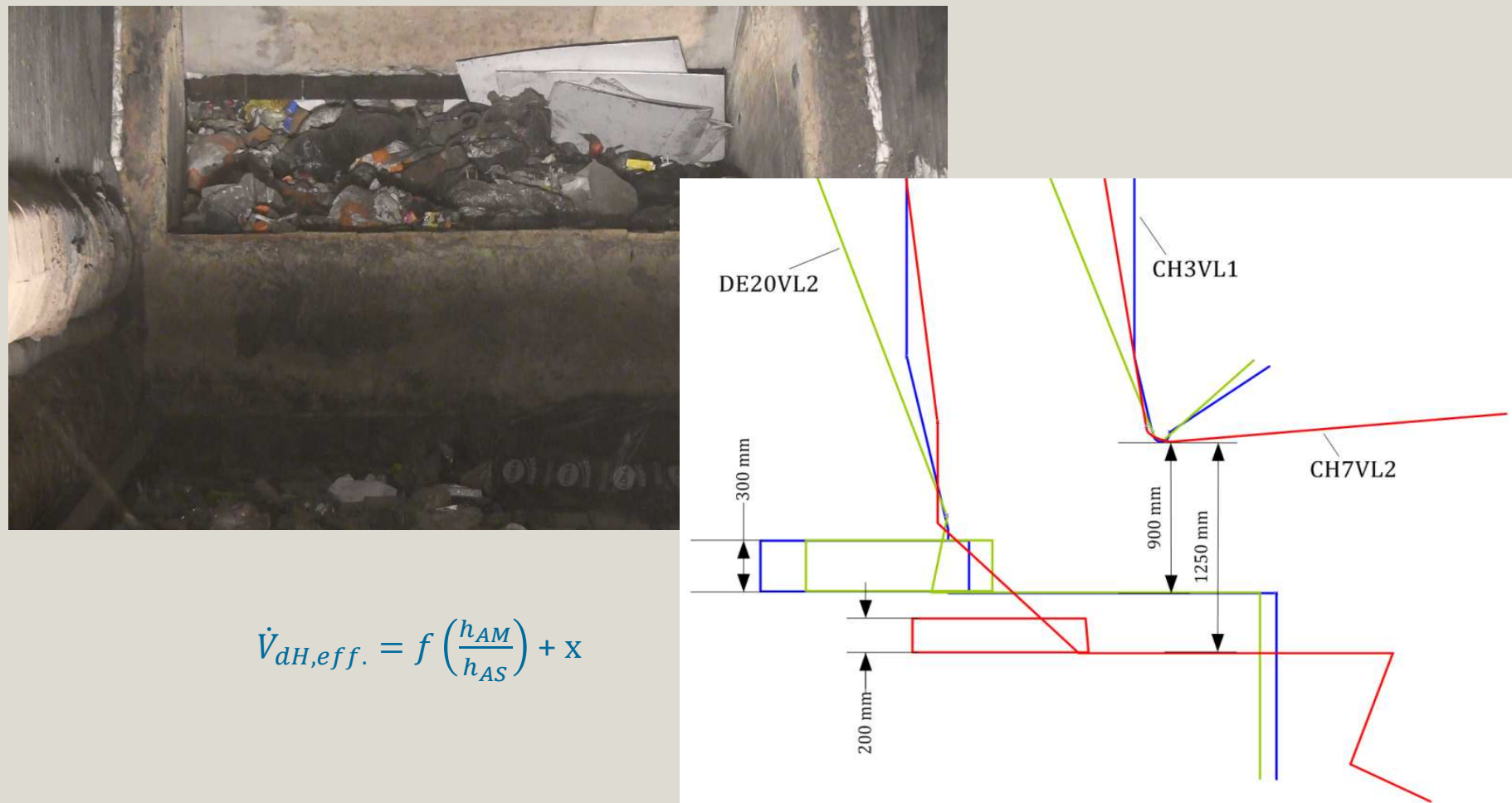


90 - 170 kg/m<sup>3</sup>



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

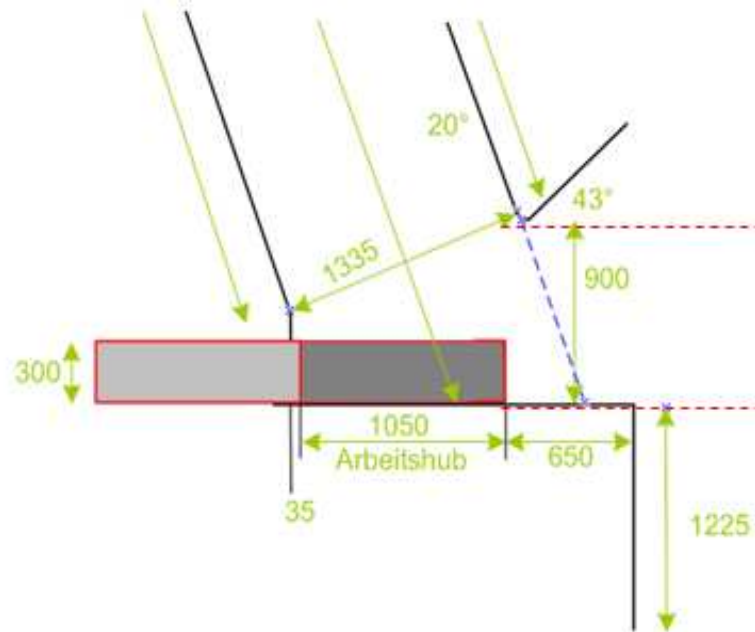
## VIDEOBILDBASIERTE BEOBACHTUNGEN



$$\dot{V}_{dH,eff.} = f \left( \frac{h_{AM}}{h_{AS}} \right) + x$$

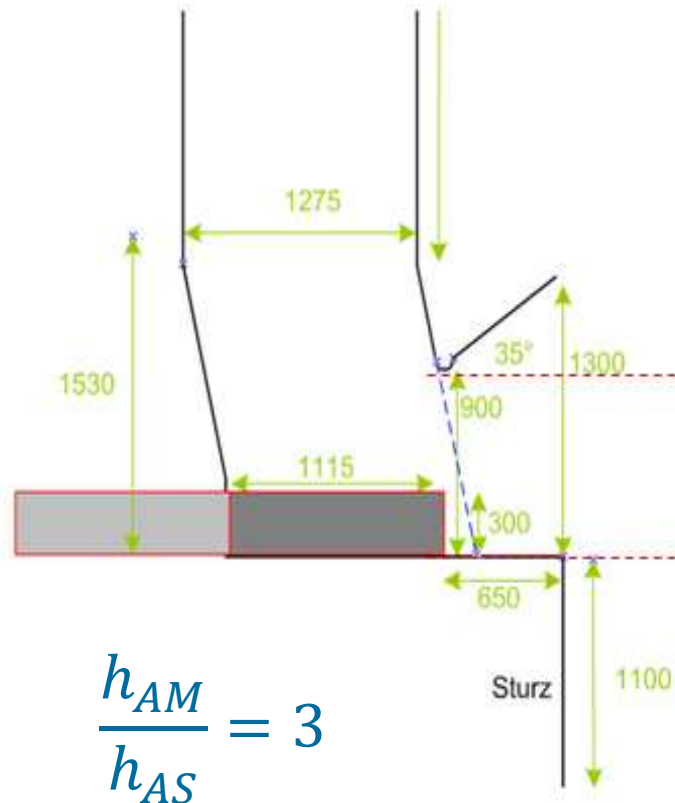
BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## BESCHICKVORGANG DE20VL2 (AUSSCHNITT AUS VIDEO)



$$\frac{h_{AM}}{h_{AS}} = 3$$

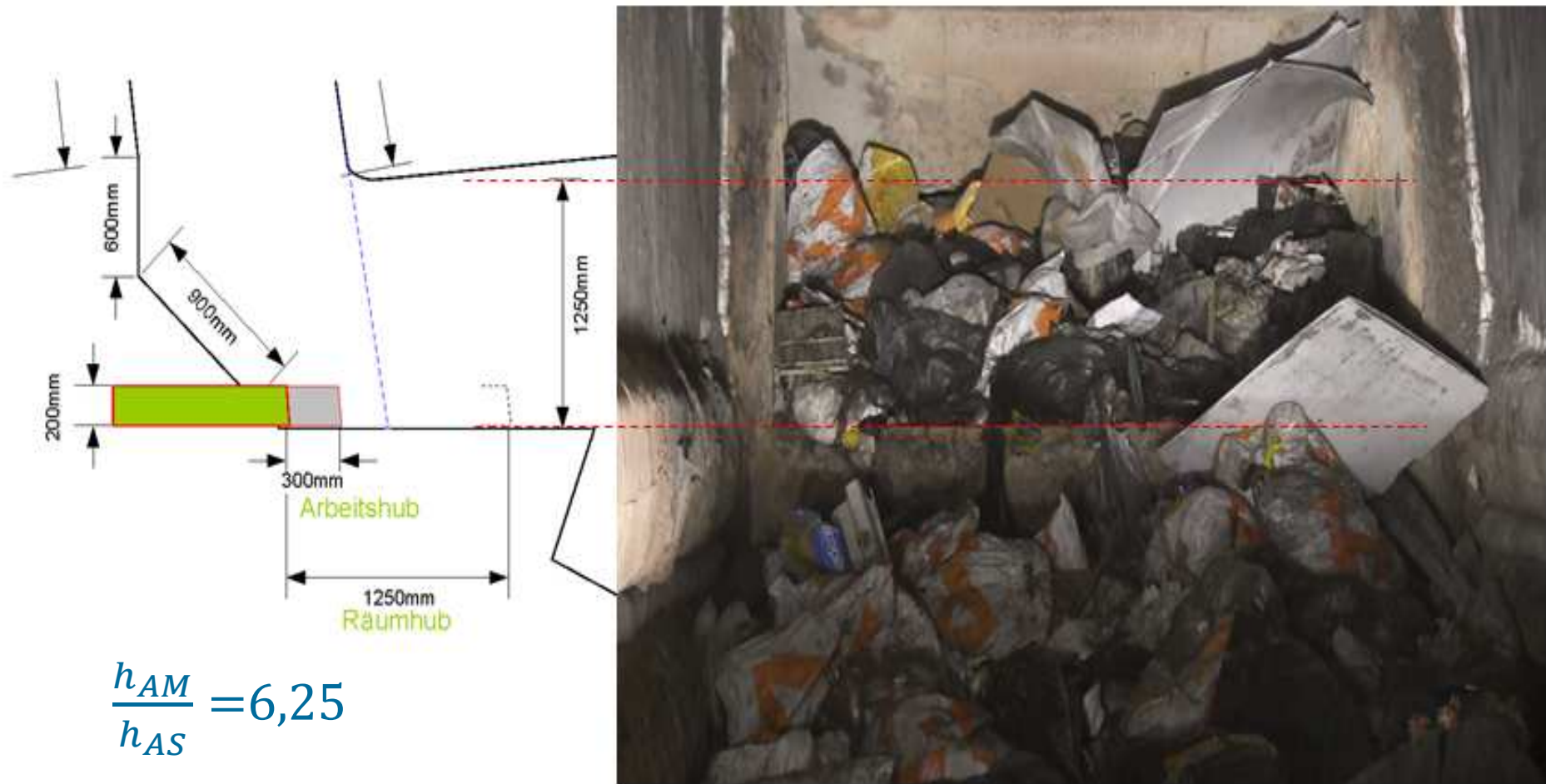
## BESCHICKVORGANG CH3VL2 (AUSSCHNITT AUS VIDEO)



$$\frac{h_{AM}}{h_{AS}} = 3$$



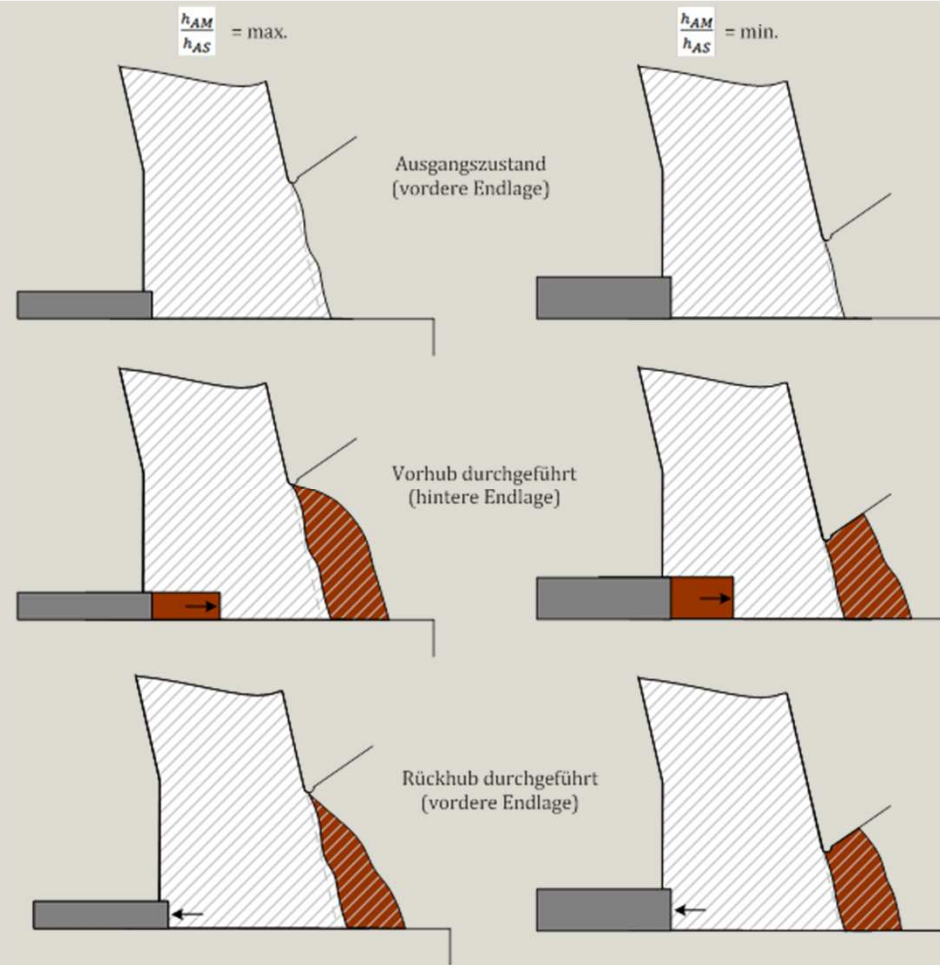
## BESCHICKVORGANG CH7VL2 (AUSSCHNITT AUS VIDEO)



$$\frac{h_{AM}}{h_{AS}} = 6,25$$

## ERKENNTNIS AUS DEN VERSUCHEN

- Fördereffektivität ist sensitiv auf das Verhältnis  $h_{AM} / h_{AS}$



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## BESTIMMUNG KOMPRESSIOnSHUB BEIM ANFAHREN

- Kompressionshub wird bei Erkennen der ersten Bewegung der Müllschüttung aus Stellung des Aufgabeschiebers ermittelt.
- 2 Verbrennungslinien (konstruktiv identisch):  
DE20VL1 = ca. 550 mm  
CH3VL1 = ca. 600 mm



- Bestimmung der mittleren Rohdichte des Mülls im Schacht.
  - Füllstand = bekannt; Massen = bekannt;
  - Volumen bzw. Geometrie = bekannt.
- DE20VL1 = ca. 250 kg/m<sup>3</sup>
- CH3VL1 = ca. 262 kg/m<sup>3</sup>

vgl. 367 kg/m<sup>3</sup>



## BESTIMMUNG KOMPRESSIOnSHUB IM LAUFENDEN BETRIEB

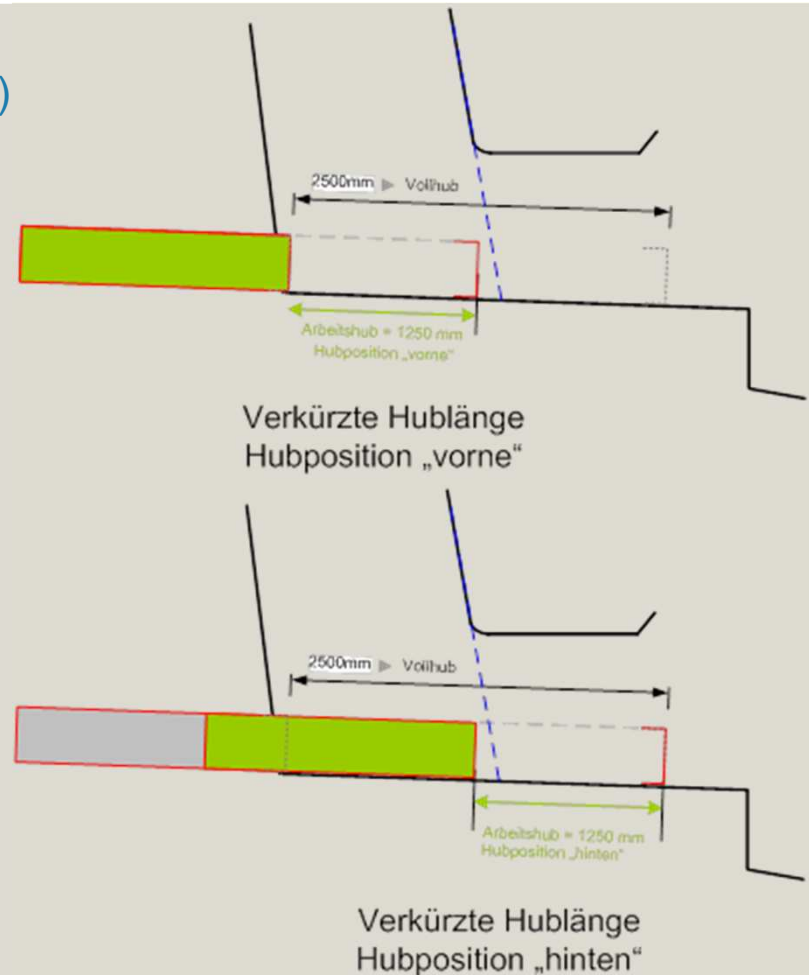
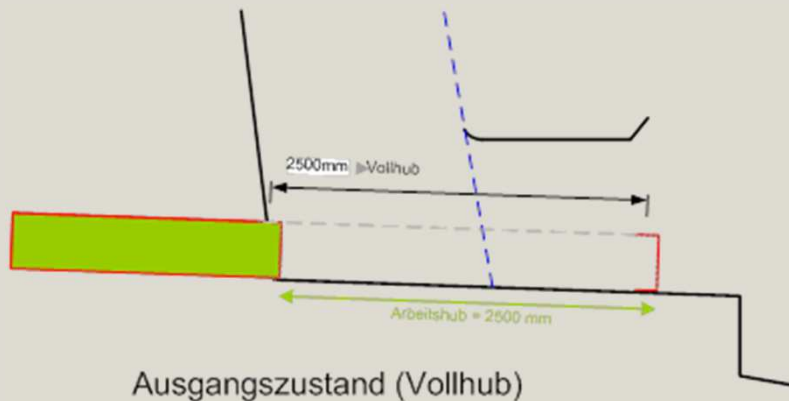
- Müllschüttung im Trichter wird (oft) beobachtet, d.h. wann rutscht der Müll während des Vorhubes nach → Kompressionshub.
  - Kompressionsanteile sind ca.  $12\% \pm 4\%$  des Vollhubes aus vorderer Endlage an DE20VL1.
  - $\cong 124\text{ mm} \pm 41\text{ mm}$ ;
- Klingt plausibler, aber warum die Abweichung zu den Versuchen beim Anfahren?



→ 2 Erklärungsversuche: Beim Anfahren generell oft „leichterer“ Müll, da dieser besser zündet und / oder es muss sich erst im Schacht im Schacht durch den laufenden Betrieb eine Art „Grundkompaktierung“ einstellen. Fazit: Anfahrvorgänge sind für diesbezgl. Beobachtungen nicht uneingeschränkt geeignet!

## VARIATION DES BESCHICKUNGSHUBS

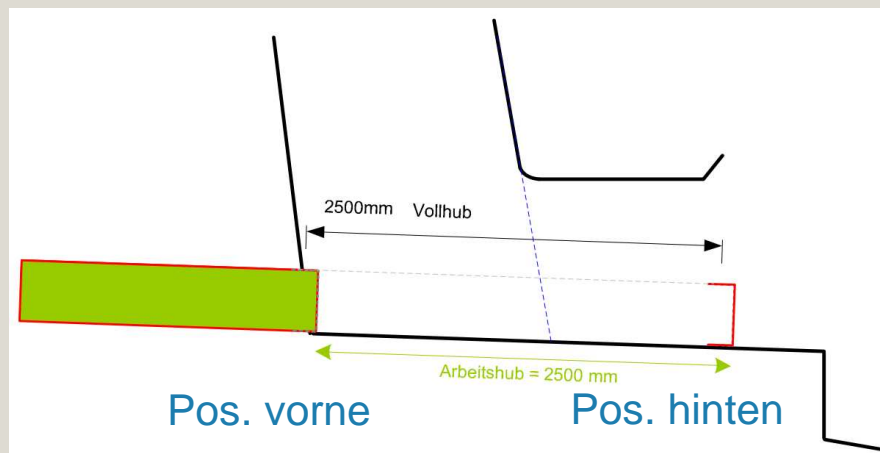
- Versuche an 2 Anlagen (UK2VL1, DE20VL1)
- Variation der Hublänge
- Variation der Hubposition



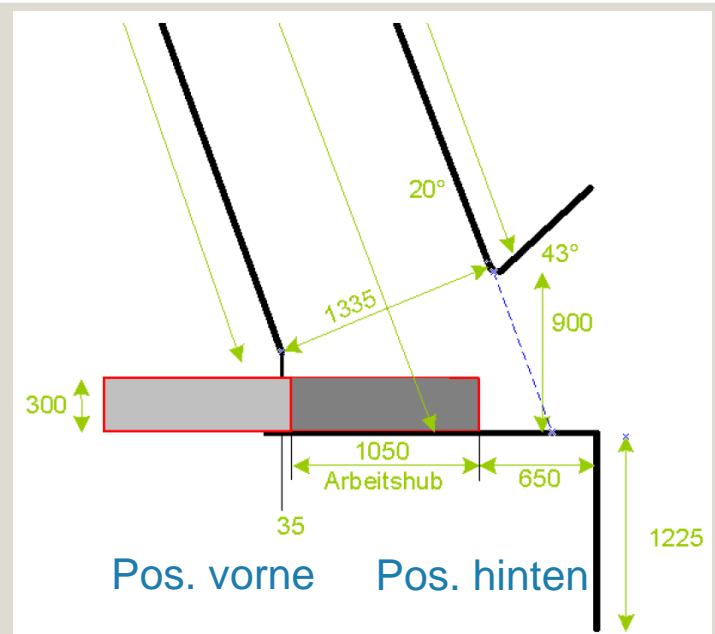
BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## VARIATION DES BESCHICKUNGSHUBS

UK2VL1:



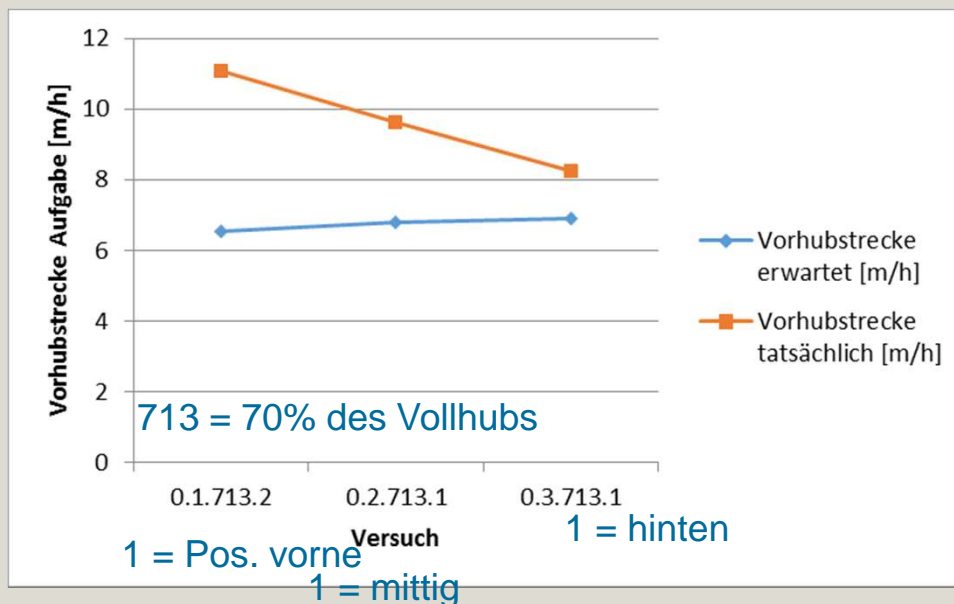
DE20VL1:



- Vergleichbare Auswertungsgrundlage = Vorhubstrecke [mm/h]
- Vorhubstrecke = Hublänge [mm] \* benötigter Hübe pro [h]
- Als Maß für einen ordnungsgemäßen Brennstoffmassenstrom wurde der produzierte Dampfmassenstrom herangezogen; Dauer = mind. 2 h pro Versuch; Annahme  $H_u = \text{const.}$

## VARIATION DES BESCHICKUNGSHUBS

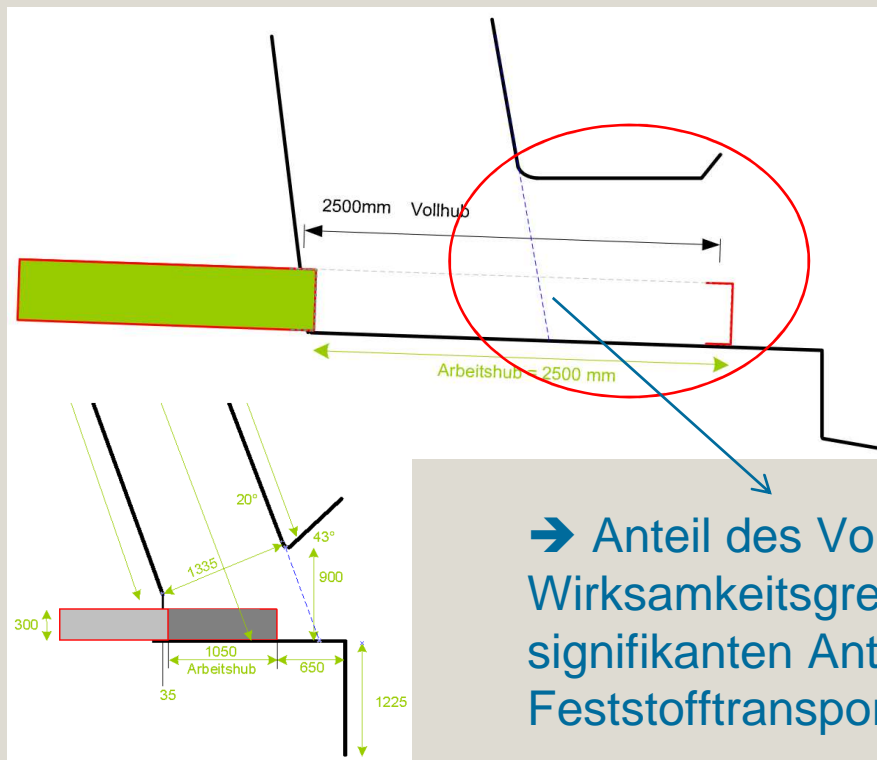
- Ergebnis DE20VL1:
  - Position: Hub auf hinterer Positionen besser fahrbar als auf vord. od. mittl. Positionen.
  - Länge: 70 % der Ausgangshublänge (Vollhub) gut fahrbar,  $\leq 50$  % schlecht fahrbar.



- Abweichung zur erwarteten Vorhubstrecke ist an der vorderen Position am größten.
- D.h. ab dieser Position wird eine überproportional große Hubstrecke benötigt.
- Nachweis f. Kompression durch den Aufgabeschieber.
- Nachweis f. Abhängigkeit der Kompression von der Position d. Hubes.

## VARIATION DES BESCHICKUNGSHUBS

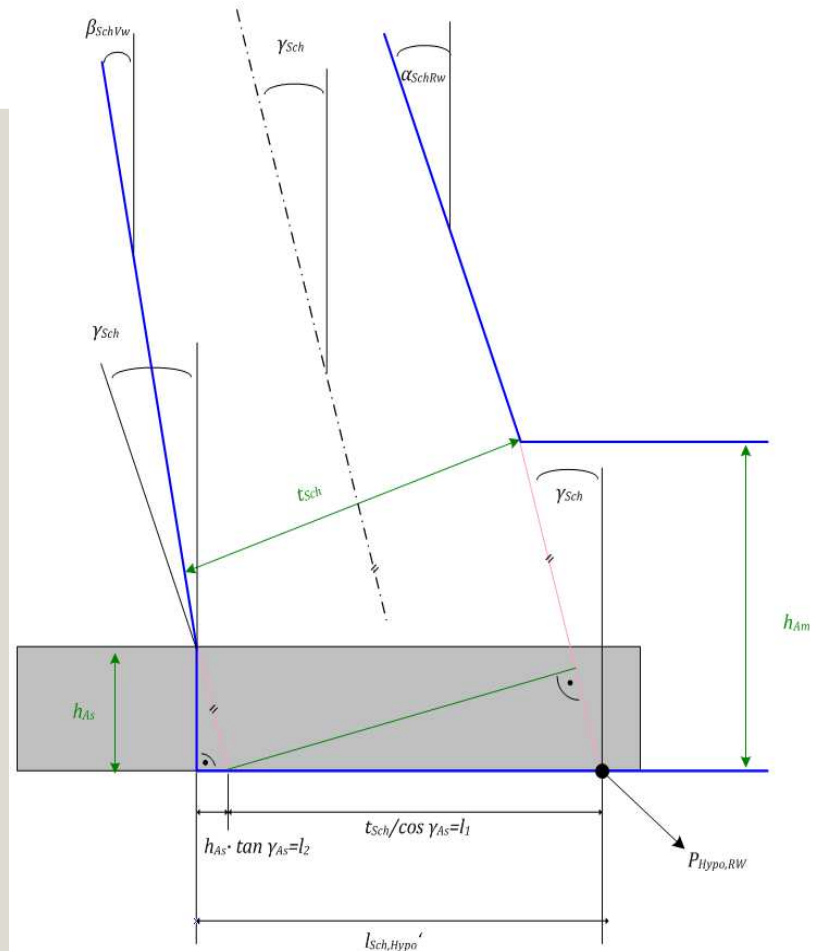
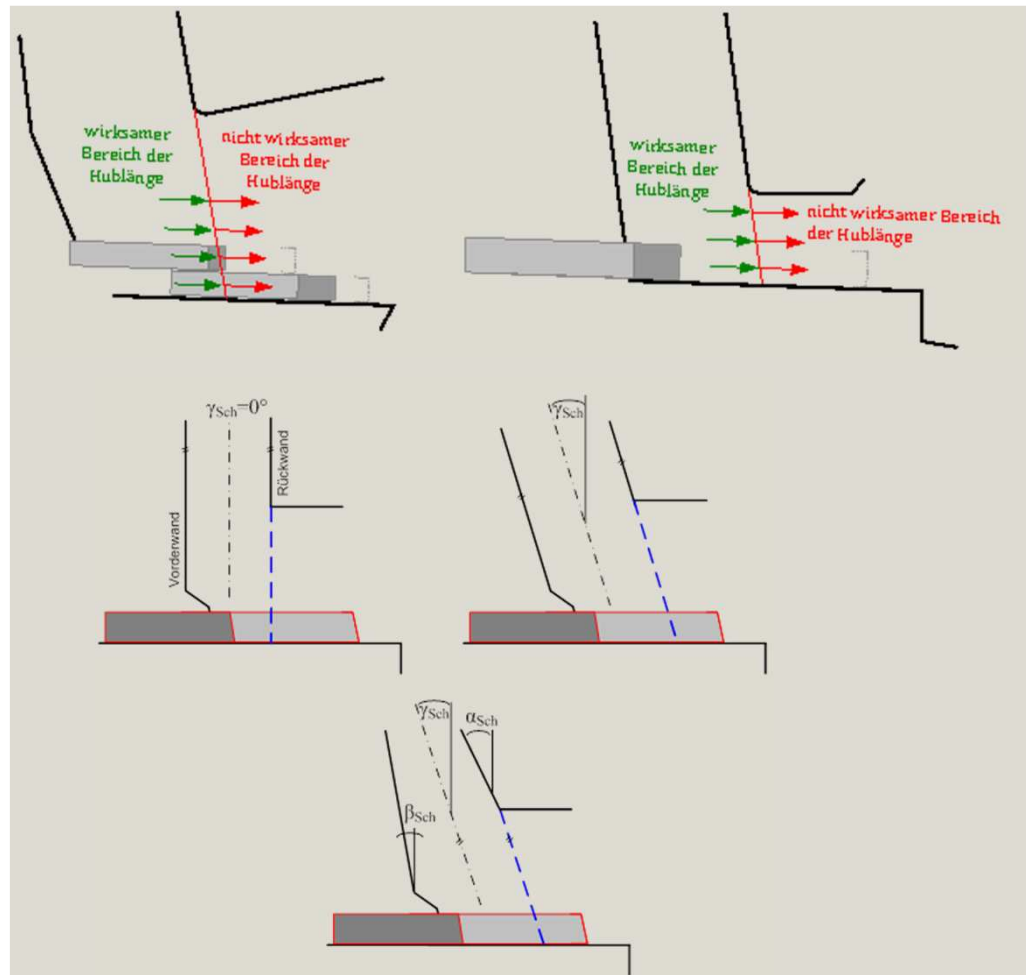
- Ergebnis UK2VL1:
- Grundsätzlich identisch, aber der Unterschied besteht darin:



- Versuche, deren Hublänge über die gedachte Verlängerung der Schachtrückwand hinausgingen, benötigten alle die identischen Hubzahlen wie die des Vollhubs.
- Erst bei einer Verkürzung der Hublänge auf  $\leq 50\%$  (kein Überschreiten dieser Linie mehr), zeigt sich identisches Verhalten wie an DE20VL1.

➔ Anteil des Vorhubs nach der sog. Wirksamkeitsgrenzlinie hat keinen signifikanten Anteil mehr am Feststofftransport.

## WIRKSAMKEITSGRENZLINIE

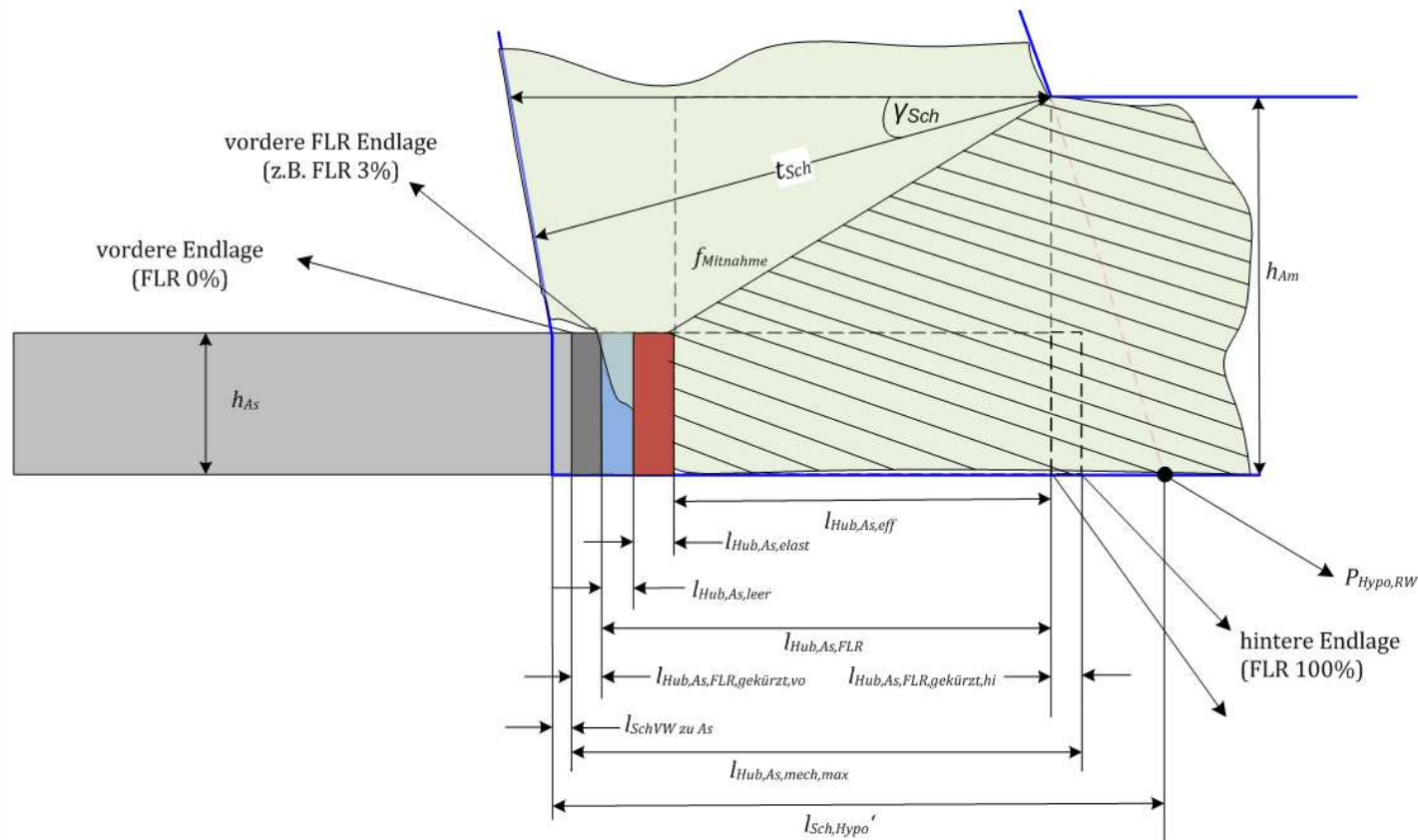


$$l_1 + l_2 = l_{Sch,Hypo'} = \frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} + h_{AS} * \tan \gamma_{Sch}$$

BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## DEFINITION DES TATS. BESCHICKHUBS

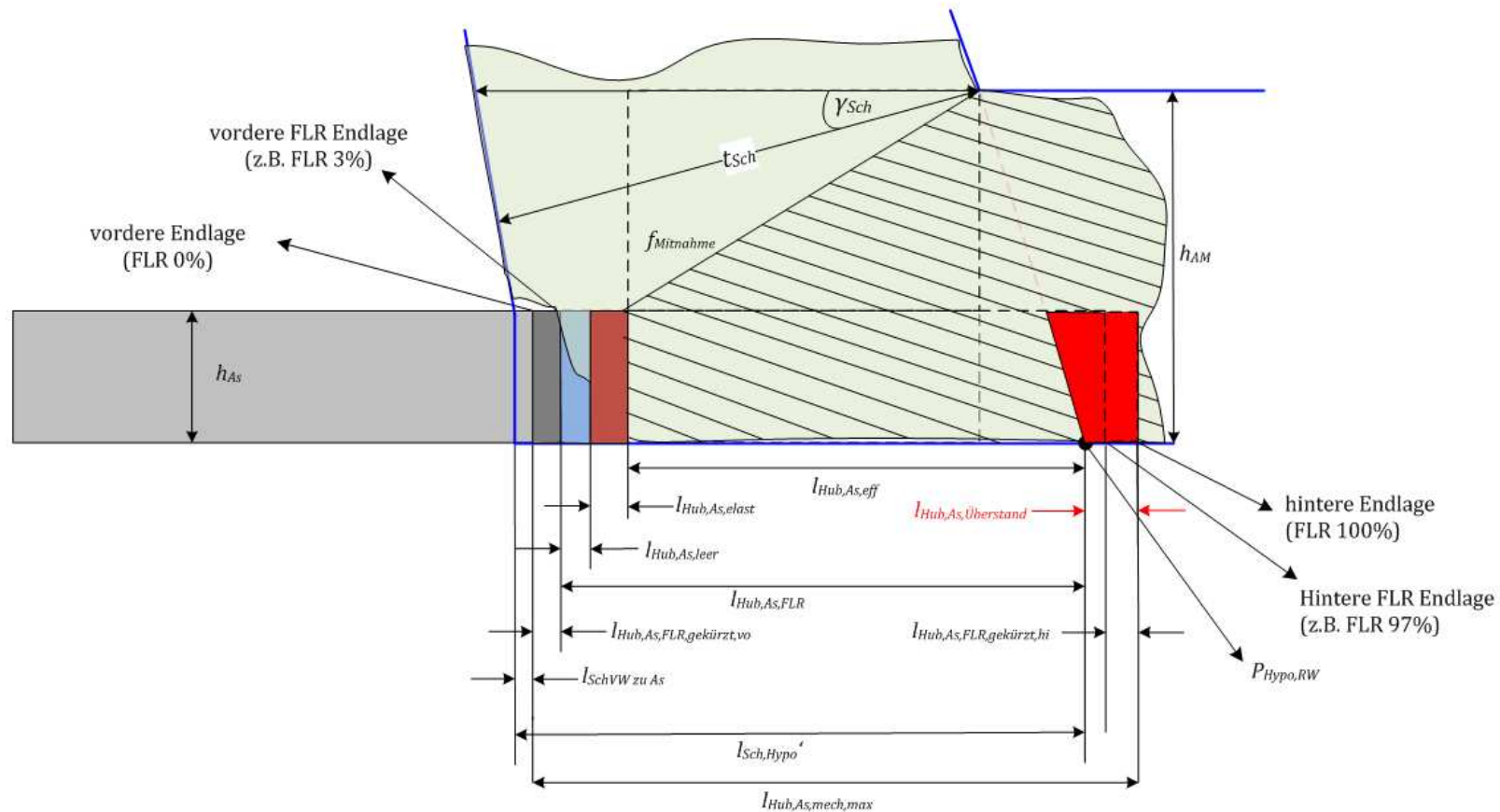
**Fall 1:** Endlage  $A_s$ , diesseits von  $P_{Hypo,RW}$



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## DEFINITION DES TATS. BESCHICKHUBS

**Fall 2:** Endlage  $A_s$ , jenseits von  $P_{Hypo,RW}$



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## BERECHNUNG BRENNSTOFFMASSENSTROM EVIDENZBASIERTER BZW. DATENGESTÜTZTER ANSATZ

- Idee – Teil 1: Modellierung der Brennstoffaufgabe nur aus Betriebsdaten und geometrischen Informationen.
- Idee – Teil 2: Über eine möglichst große Quantität an Daten sollte die max. mögliche Bandbreite an Anlagengrößen, Rosttechnologien, Feuerraumgeometrien inkl. Extremwerten abgedeckt sein. Damit sollte die Übertragbarkeit auf andere (noch nicht existierende) Anlagen gesichert sein.
- Angefragt wurden 65 Anlagenstandorte in 11 europ. Ländern mit in Summe 160 VL.
- Umfangreiche Kriterien notwendig, um die Qualität der Daten zu evaluieren und um diese aufzubereiten um sie vergleichbar zu machen (Zeitaufwand  $\rightarrow \infty$ ).

		Länder:					
		DE	AT	CH	PL	UK	NL
Typ Feuerung	W	14	-	-	-	-	-
	V	18	2	1	2	1	2
	R	2	-	2	-	-	-
	H	1	-	-	-	-	-
	K	-	-	-	-	-	-

- 45 VL
  - Konstruktionszeichnungen der Feuerung
  - Betriebsdaten
  - Allgemeine Angaben zur VL

## BERECHNUNG BRENNSTOFFMASSENSTROM EVIDENZBASIERTER ANSATZ

- Masse pro Dh Variante 1 (Müllbilanz)

$$m_{dH,Aufgabe} = \frac{\sum m_{ges.Müll}}{\sum n_{dH,Aufgabe}}$$

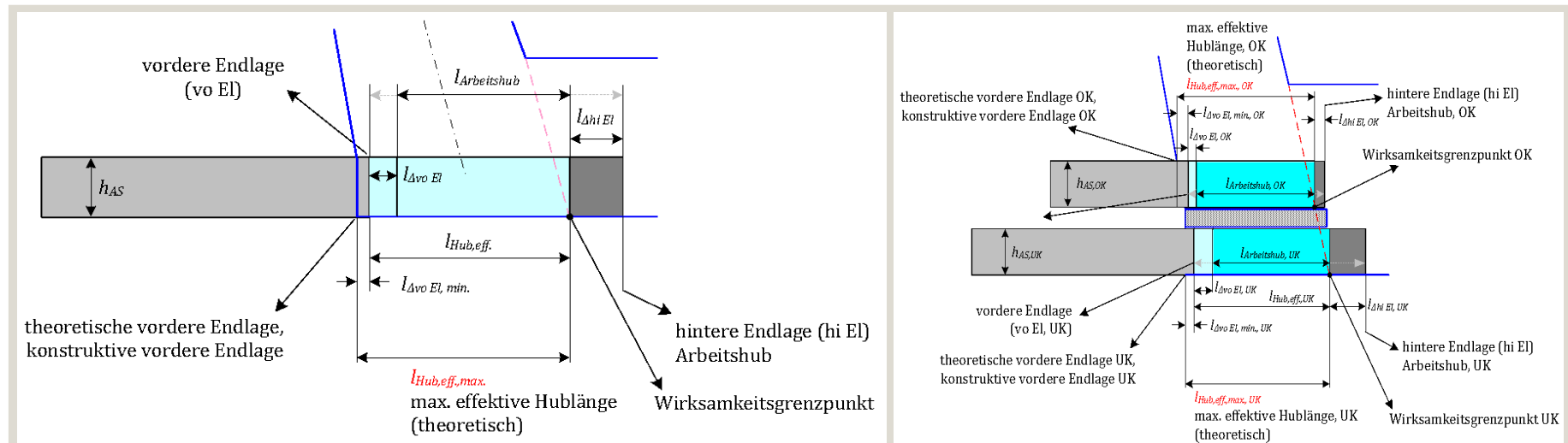
- Masse pro Dh Variante 2 (Kranbilanz)

$$\Phi m_{Kran(x)} = \frac{\sum_k^x m_{Kran(k)}}{k}$$

$$\Phi n_{dH(x)} = \frac{\sum_l^x n_{dH,Aufgabe(l)}}{l}$$

$$m_{dH,Aufgabe} = \frac{\Phi \dot{m}_{Kran(x)}}{\Phi n_{dH,Aufgabe(x)}}$$

## DEFINITION BESCHICKHUB, HUBLÄNGEN



- In Abgrenzung zu den vorgängigen Betrachtungen, sollen in diesem Ansatz ausschließlich betrieblich nachweisbare Parameter Verwendung finden.
- Fallunterscheidung:

$$l_{Hub,eff.} - l_{Arbeitshub} \geq 0 \Rightarrow l_{Hub,eff.,tats.} = l_{Arbeitshub}$$

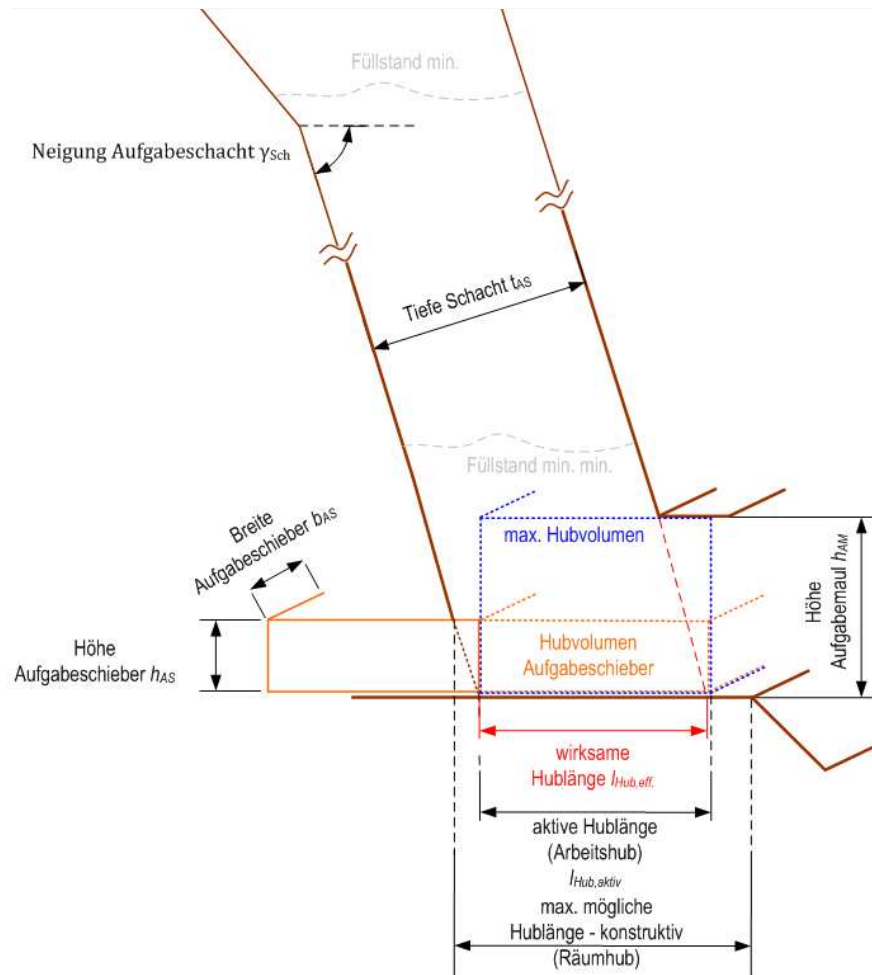
$$l_{Hub,eff.} - l_{Arbeitshub} < 0 \Rightarrow l_{Hub,eff.,tats.} = l_{Arbeitshub} - l_{\Delta hi El, min.}$$

$$\Rightarrow l_{Hub,eff.,tats.} \geq l_{Hub,eff.} \text{ oder } l_{Hub,eff.,tats.} \leq l_{Hub,eff.}$$

Wirkungsgrad des Beschickstößels:

$$\eta_{Stößel} = \frac{l_{Hub,eff.,tats.}}{l_{Arbeitshub}}$$

## FÖRDERVOLUMEN



$$\dot{V}_{dH,AS} = \Phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AS} \cdot l_{Hub,eff.,tats.}$$

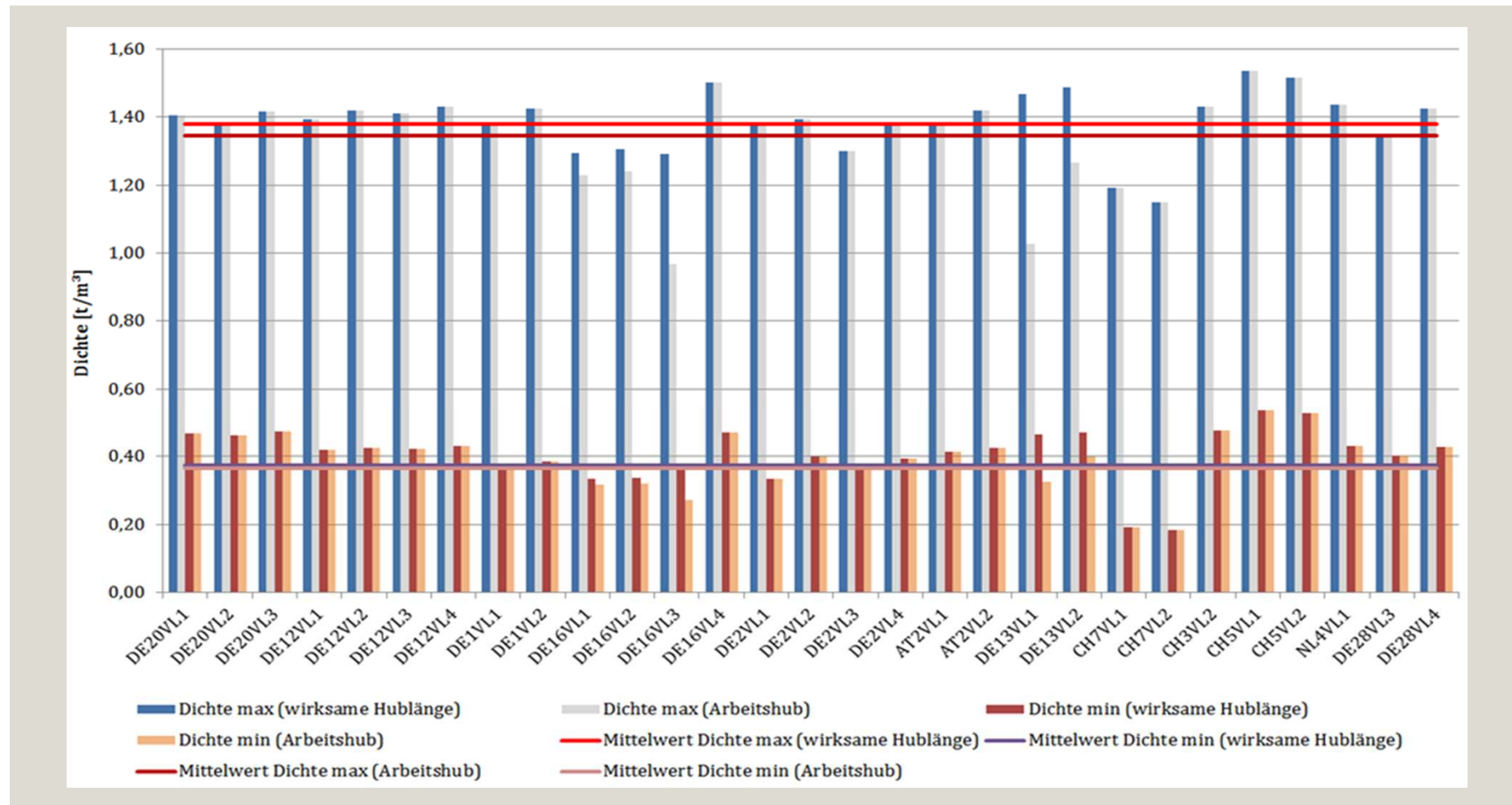
$$\dot{V}_{dH,max.} = \Phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AM} \cdot l_{Hub AS,eff.,tats.}$$

→ Maximale und minimale Dichten:

$$\rho_{max.} = \frac{\Phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,AS}}$$

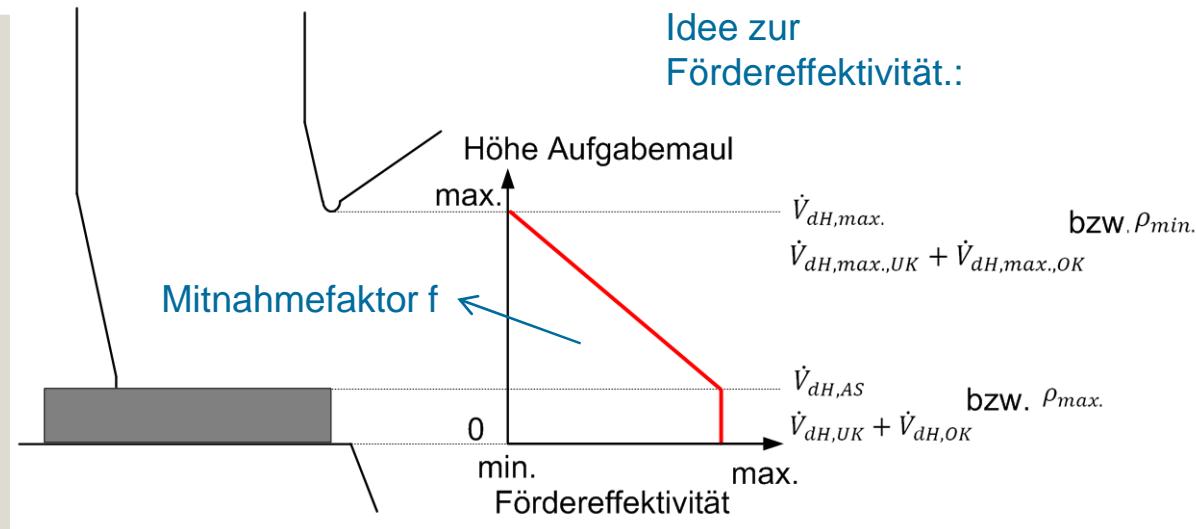
$$\rho_{min.} = \frac{\Phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,max.}}$$

## MIN.- UND MAX.-ROHDICHTEN



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## FÖRDEREFFEKTIVITÄT

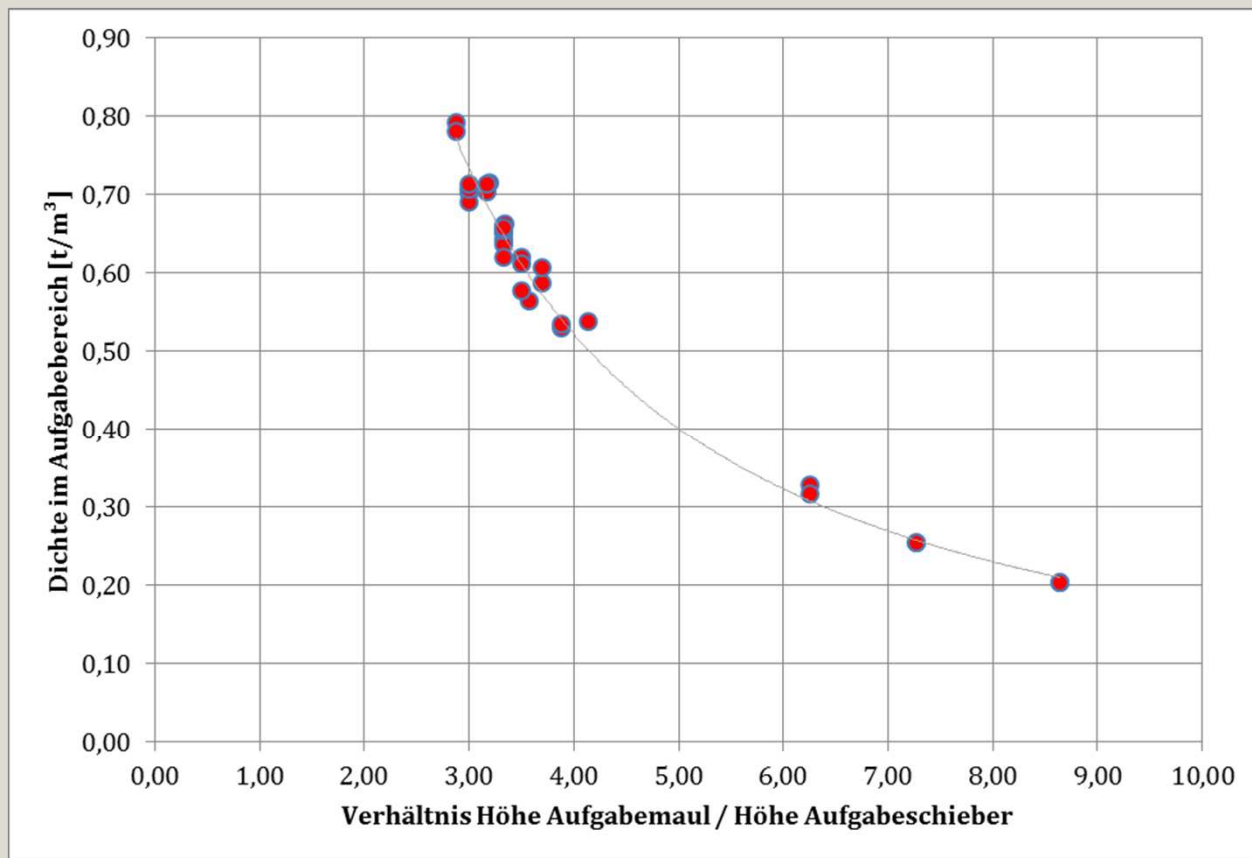


$$\dot{V}_{dH,eff.} = (\phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AS} \cdot .) + \left( \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,tats.} \right) =$$

$$\dot{V}_{dH,eff.} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ A,eff.,tats.} \cdot \left( h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right)$$

Die Dichte  $\rho_{eff.}$  ergibt sich aus:  $\frac{\phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,eff.}}$

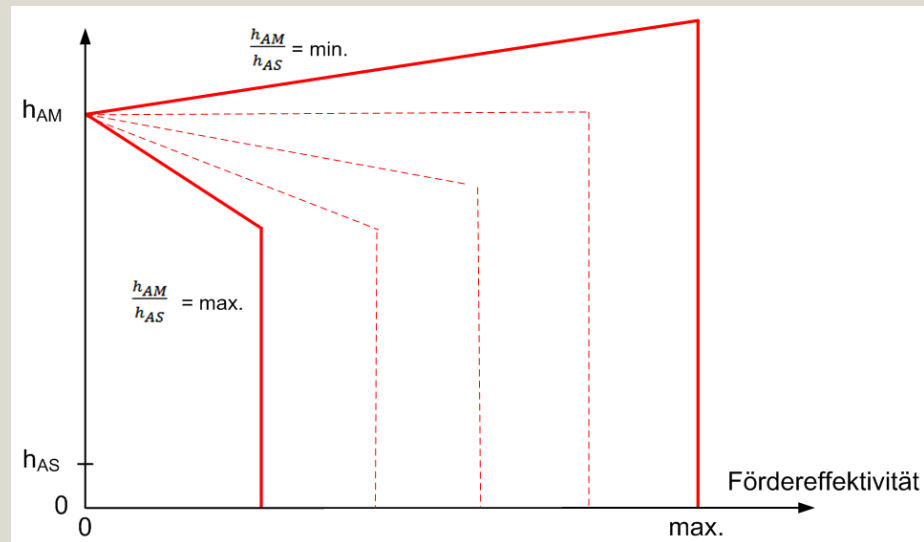
## RÜCKBLLENDE



Abhängigkeit von  $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$   
berücksichtigt werden!

## FORMEL MIT BERÜCKSICHTIGTEM KONSTRUKT. FAKTOR

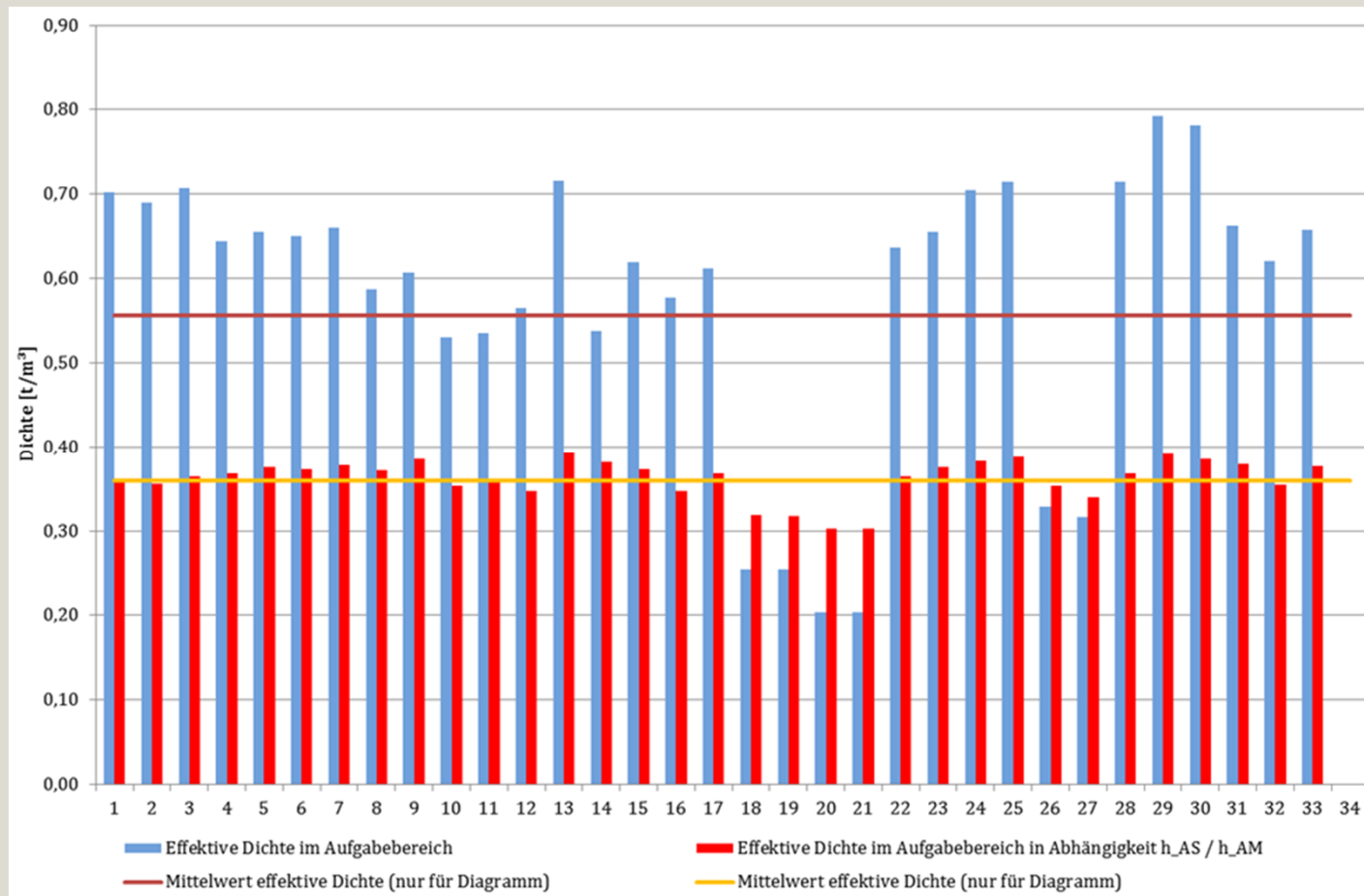
Erweiterte Idee zur Fördereffektivität.:



$$\dot{V}_{dH,eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}} = \frac{h_{AM}}{h_{AS}} \cdot \left[ \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,tats.} \cdot \left( h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right) \right]$$

$$\phi \dot{m}_{Kran(x)} = \rho_{eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}} \cdot \left[ \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,tats.} \cdot \left( h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right) \right]$$

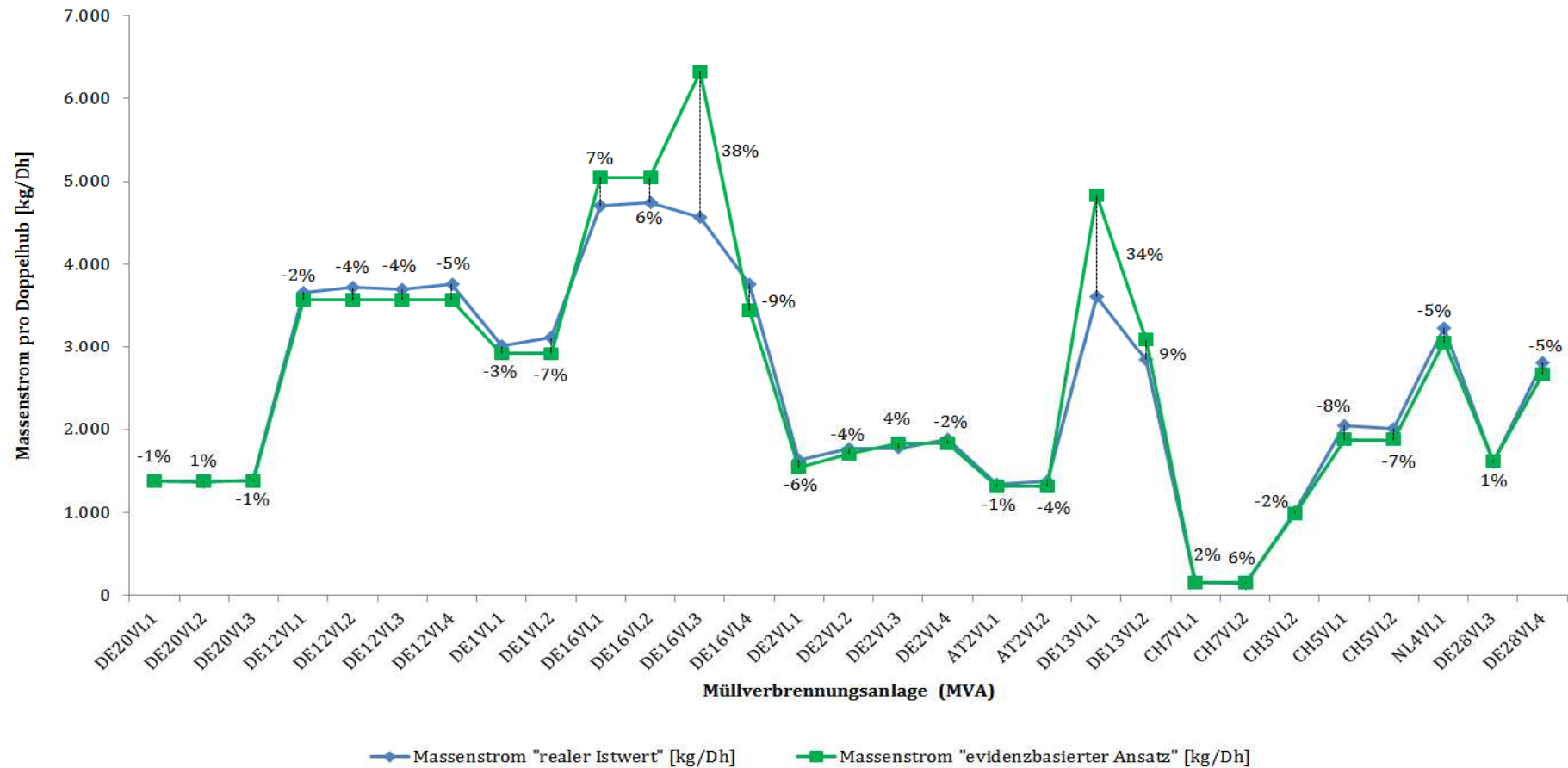
## RESULTATE TEIL 1



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - [MARTIN ZWIELLEHNER](#), RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## RESULTATE TEIL 2

### Abweichung evidenzbasierter Ansatz zu Betriebsdaten



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER

## GEOMETRISCH-PHYSIKALISCHER ANSATZ

- Idee: Dieser Ansatz basiert ausschließlich auf den geometrischen Gegebenheiten der jeweiligen MVA und allgemeingültigen, physikalischen Zusammenhängen.
- Keine historischen Betriebsdaten notwendig.
- In die Berechnung des Massenstroms an der Aufgabe gehen neben der Geometrie auch verschiedene Kräfte, Drücke, Reibungskoeffizienten usw. mit ein.
- Anwendung der vorab diskutierten Versuche unter der Annahme der Übertragbarkeit.

## GEOMETRISCH-PHYSIKALISCHER ANSATZ

$$\dot{m}_{Dh,As,eff} = \rho_{Müll,komp\ vor\ As,As-position} \cdot \dot{V}_{Dh,As,eff}$$

$$\dot{m}_{Dh,As,eff} = \rho_{Müll,komp\ vor\ As,As-position} \cdot [\dot{n}_{Dh,As,i} \cdot b_{As} \cdot h_{Am} \cdot l_{Hub,eff}]$$

Mit:

$$\begin{aligned} \rho_{Müll,komp\ vor\ As} &= 503784 \cdot p_{Müll,vh}^5 - 574030 \cdot p_{Müll,vh}^4 + 244120 \cdot p_{Müll,vh}^3 \\ &- 48263 \cdot p_{Müll,vh}^2 + 4996,6 \cdot p_{Müll,vh} + \rho_{Müll,Schütt} \end{aligned}$$

Aus Versuchen:

$$\rho_{Müll,Schütt} = 275 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{Müll,Aufgabe} = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$l_{Hub,As,eff} = (l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,Kompression}) \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme})$$

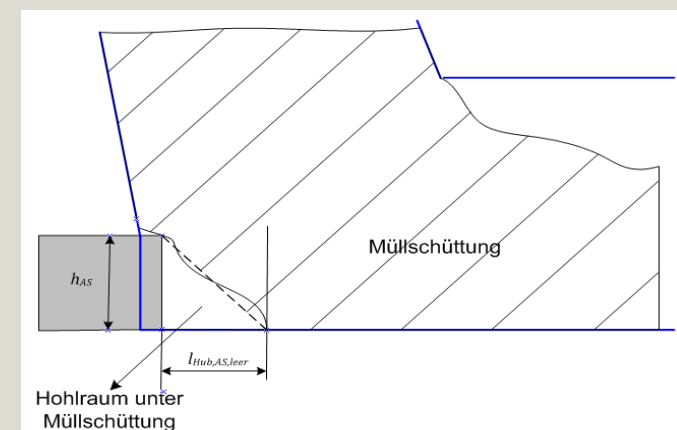
- Der Kompressionsanteil:

$$l_{Hub,As,Kompression} = l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,leer} - l_{Hub,As,elast}$$

- Für den Leerhub wurde ein Faktor festgesetzt; die Möglichkeit ihn aus der Höhe des Schiebers und den Schüttwinkel zu berechnen besteht. Jedoch wird nicht bei jedem Dh der Leerhubanteil gleich groß sein.

$$l_{Hub,As,leer} = h_{As} \cdot f_{leer}$$

$$f_{leer} = const. = 0,05$$



- Massenerhalt bei Kompression eines konstanten Volumens:

$$l_{Hub,As,elast} = l_{Hub,Hypo,elast} \cdot \frac{\rho_{Müll,kompr,Aufgb} - \rho_{Müll,Aufgabe}}{\rho_{Müll,Aufgabe}}$$

- Die verschiedenen Dichten können mit Hilfe des Polynoms berechnet werden.
- Mit:  $l_{Hub,Hypo,elast} = l_{Sch,Hypo}' - l_{SchVW \text{ zu } AS} - l_{Hub,As,leer} - l_{Hub,As,FLR,gekürzt,vo}$
- Um die Dichte  $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$  (Dichte des Mülls vor dem Aufgabestößel) zu erhalten, wurde der Druck am Aufgabezylinder  $p_{Vh}$  gemessen.

## KRÄFTE

- Wie hoch ist die Kraft des Schiebers auf die Müllschüttung:  $F_{Vh} = n_{Asz} \cdot p_{Vh} \cdot A_{Kolben,Vh,Asz}$
- Rückhubbetrachtung:  $F_{R,Rh,As} = n_{Asz} \cdot p_{Rh} \cdot A_{Kolben,Rh,Asz}$
- Öldruck im Rückhub muss eine Kraft erzeugen > Summe der Reibkräfte zwischen Aufgabestößel / Müll und Aufgabestößel / Aufgabetisch.
- Stößel / Tisch vernachlässigbar (Stahlrollen; Messungen während Revision).
- Daraus folgt ein Gleitreibungskoeffizient für Müll auf Stahl:

$$\mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}} = \frac{F_{R,Rh,As}}{p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,As,FLR} \cdot b_{As}} = 0,47$$

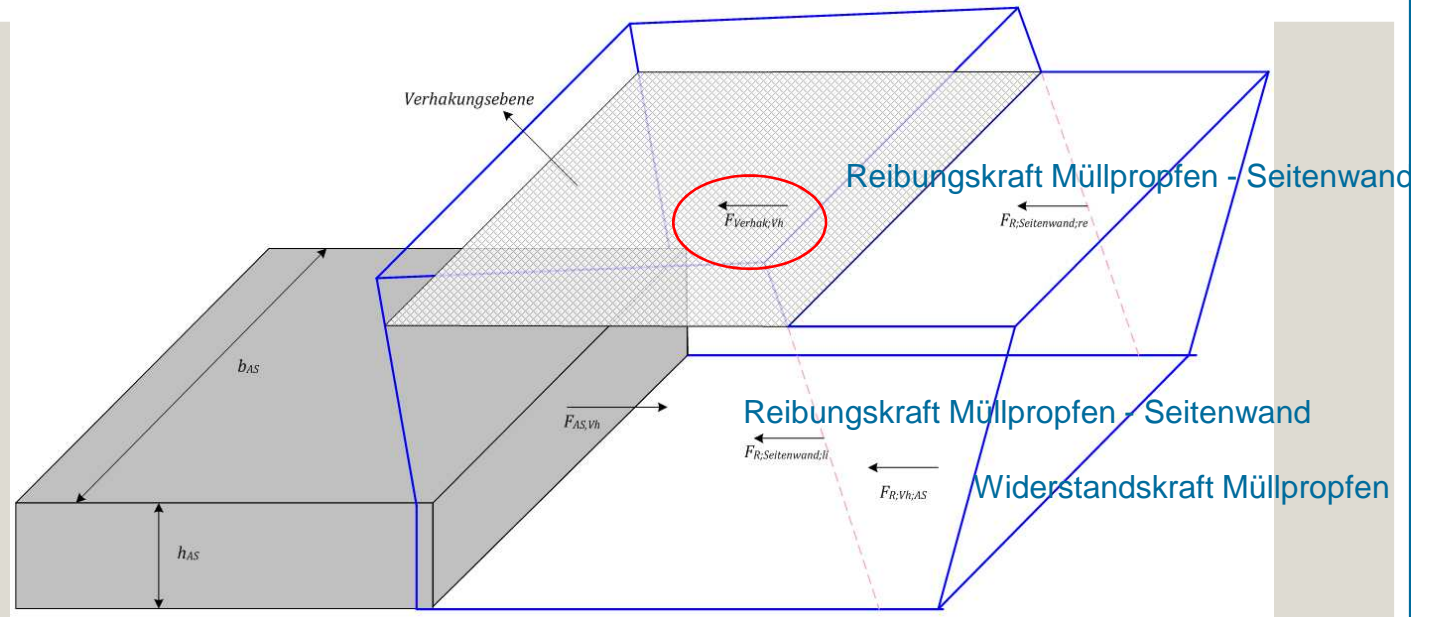
- Damit können die Reibkräfte an den Wänden und am Aufgabetisch berechnet werden:

$$F_{R,ges,Seitenwände} = 2 \cdot \mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}} \cdot F_{N,Seitenwand \text{ durch Müllsäule}}$$

- Mit:  $F_{N,Seitenwand \text{ durch Müllsäule}} = p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,Hypo,elast} \cdot h_{Am}$
- Für den Aufgabestößel gilt:  $F_{R,Vh,As} = p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,Hypo,elast} \cdot b_{As}$

## GEGENKRAFT IN DER VERHAKUNGSEBENE

Der Rest der Vorhubkraft muss in der Verhakungsebene wirken:  $F_{Verhak,Vh} = F_{Vh} - F_{R,Vh,AS} - F_{R,ges,Seitenwände}$



Damit kann für jede beliebige Anlage der Druck auf den Müll während des Vorhubs berechnet werden:

$$p_{Müll,Vh} = \frac{F_{Verhakung \text{ pro } m^2} \cdot \left( \frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} - l_{SchVW \text{ zu } AS} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} \right) + F_{R,Vh,AS} + F_{R,ges,Seitenwände}}{b_{AS} \cdot h_{Am}}$$

Mit Normierung für andere Anlagen:  $F_{Verhakung \text{ pro } m^2} = \frac{F_{Verhak,Vh}}{\frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} - l_{SchVW \text{ zu } AS} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo}} = 4600 \frac{N}{m^2}$

Anschließend die Fallunterscheidung für die wirksame Hublänge:

*Fall 1:*

$$l_{Sch,Hypo}' \geq l_{Hub,AS,mech,max} + l_{AS \text{ zu } SchVW} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

*Es gilt:*

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Hub,AS,mech,max} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

*Fall 2:*

$$l_{Sch,Hypo}' \leq l_{Hub,AS,mech,max} + l_{AS \text{ zu } SchVW} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

*Es gilt:*

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Sch,Hypo}' - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} - l_{AS \text{ zu } SchVW}$$

*Der Überstandshub kann für Fall 2 ausgegeben werden:*

$$l_{Hub,AS,Überstand} = l_{Hub,AS,mSch,max} - l_{Sch,Hypo}' - l_{AS \text{ zu } SchVW}$$

- Der ermittelte Mitnahmefaktor am GKS SW von 1,1 wird wie folgt auf andere anlagen übertragen:

$$f_{\text{Mitnahme},i} = f_{\text{Mitnahme},SW} - f_{\text{Mitnahme},SW} \cdot \frac{\frac{h_{Am,i}}{h_{As,i}} - \frac{h_{Am,SW}}{h_{As,SW}}}{\frac{h_{Am,SW}}{h_{As,SW}}} - \sin(\gamma_{Sch,SW} - \gamma_{Sch,i}) \cdot \frac{h_{As,i}}{h_{Am,i}}$$

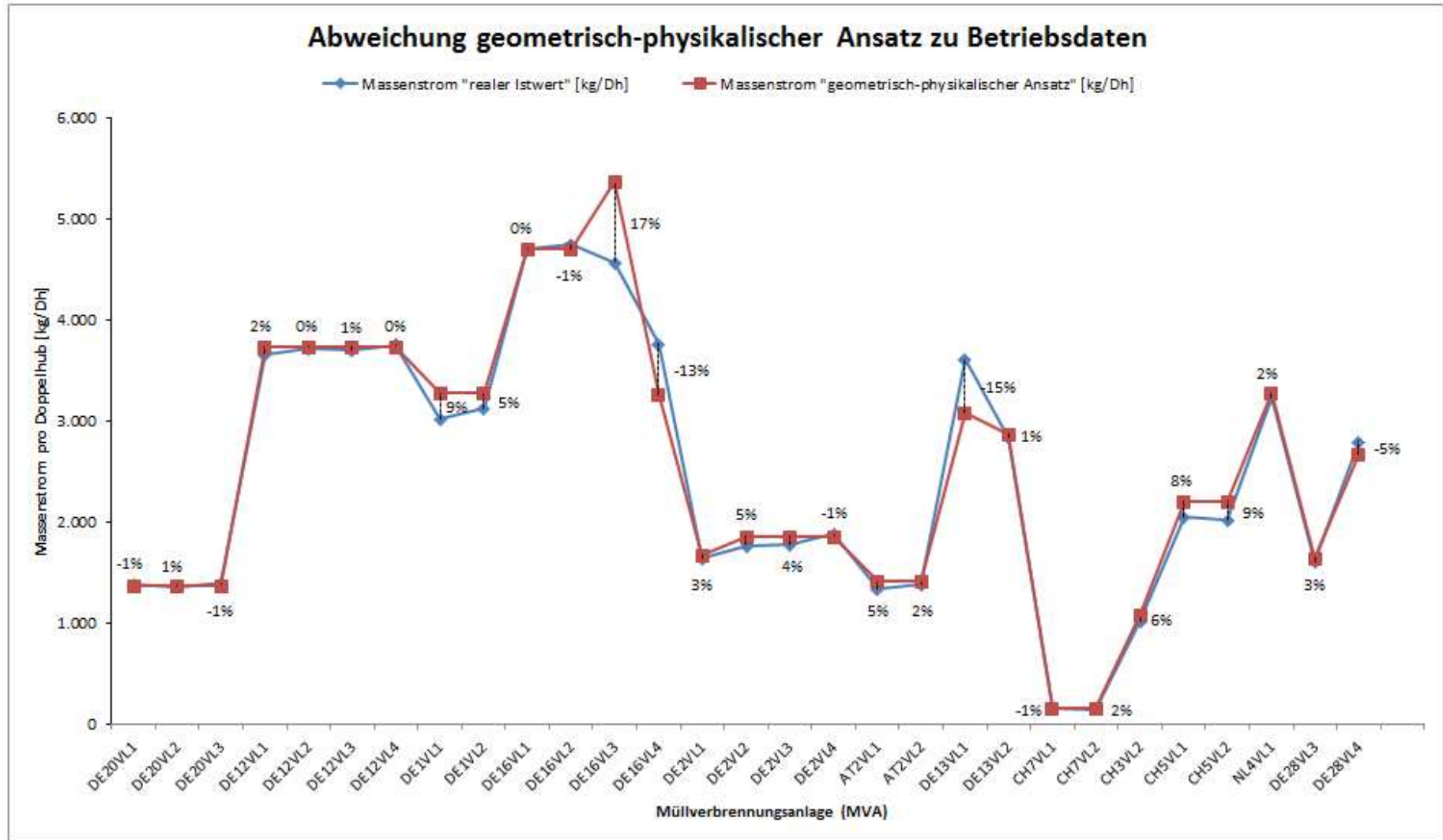
- Die Möglichkeit der Hubpositionsveränderung an einer Anlage wirkt sich in der geförderten Dichte aus, deshalb wird ausgehend vom Vollhub die Dichte für ein verkürzten Hub berechnet:

$$\rho_{\text{Müll,komp vor As,As-position}} = \rho_{\text{Müll,komp vor As}} + (\rho_{\text{Müll,komp vor As}} - \rho_{\text{Müll,Aufgabe}}) \cdot \frac{l_{\text{Hub,As,FLR}} - l_{\text{Hub,As,FLR,normal}}}{l_{\text{Hub,As,FLR,normal}}}$$

Final die Massenstromformel an der Aufgabe für eine Einzelkolbenbeschickung:

$$\dot{m}_{Dh,As,eff} = \rho_{Müll,komp \text{ vor } As,As\text{-position}}$$

$$\cdot \left[ \begin{array}{c} \dot{n}_{Dh,As,i} \cdot b_{As} \cdot h_{Am} \cdot (l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,Kompression}) \\ \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme}) \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme}) \end{array} \right]$$



BESCHREIBUNG DES BRENNSTOFFTRANSPORTS MIT „EINFACHEN GLEICHUNGEN“ - MARTIN ZWIELLEHNER, RAGNAR WARNECKE, FLORIAN GRAFMANS, VOLKER MÜLLER